



Pedro Miguel Xavier Carço Prata Ribeiro

Licenciado em Ciências da Engenharia

Encurvadura lateral em vigas de alumínio

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Estruturas

Orientador: Professor Doutor Rodrigo de Moura Gonçalves

Júri:

Presidente: Professor Doutor António Pinho Ramos

Arguente: Professor Doutor João Carlos Rocha de Almeida

Vogal: Professor Doutor Rodrigo Moura Gonçalves

Dezembro de 2013

“Copyright” Pedro Miguel Xavier Carço Prata Ribeiro, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Antes de mais, permitam-me que faça alguns agradecimentos.

Em primeiro lugar, como não podia deixar de ser, ao Professor Doutor Rodrigo de Moura Gonçalves pela orientação, apoio, disponibilidade permanente e conhecimento partilhado. Refiro também a paciência em aturar as minhas interrogações e dúvidas.

Tenho de agradecer aos meus pais, ao meu irmão, ao meu padrasto e restante família pela motivação e essencialmente pela paciência no decorrer do meu percurso académico.

Não posso esquecer os meus amigos e colegas, em especial o Helder Parreira, João Gonçalves, João Grilo, Miguel Ganhão e Pedro Antunes e pela amizade, companheirismo e pelos momentos inesquecíveis vividos e partilhados ao longo destes anos.

Por último, a todos os estudiosos que me permitiram a pesquisa e o conhecimento fundamental para este trabalho.

Fica aqui o meu mais sincero e genuíno agradecimento.

Resumo

A presente dissertação tem como objetivo o estudo do fenómeno de encurvadura lateral em vigas de alumínio com secção em I, simplesmente apoiadas e sujeitas a flexão pura (momento uniforme ao longo da viga). Em particular, estuda-se uma abordagem alternativa à do Eurocódigo 9 (EC9), que consiste em utilizar esbeltezas normalizadas que são função da carga crítica elastoplástica da viga. Para o efeito, é desenvolvido um programa de cálculo automático em MATLAB.

A abordagem é aplicada (i) à curva de dimensionamento do EC9, (ii) a resultados numéricos, utilizando um programa de elementos finitos, e (iii) aos resultados experimentais obtidos por Y.Q. Wang, H.X. Yuan, Y.J. Shi e M. Cheng [1]. Mostra-se que se obtém uma significativa dispersão com a curva do EC9 mas, por oposição, uma reduzida dispersão com os resultados numéricos e experimentais. Por fim, mostra-se que os resultados numéricos para esbeltezas reduzidas (elevadas) conduzem a valores da resistência à encurvadura significativamente inferiores (superiores) aos do EC9.

Palavras-chave: Vigas de alumínio, secções em I, encurvadura lateral, Eurocódigo 9, cargas críticas elastoplásticas

Abstract

This thesis aims at investigating the lateral-torsional buckling phenomenon in aluminium I-beams, simply supported and subjected to uniform bending. In particular, an alternative approach to Eurocode 9 (EC9) is investigated. This approach consists in employing a normalized slenderness which is calculated with true elastoplastic bifurcation loads. A MATLAB routine is developed for this task.

This approach is applied (i) to the EC9 buckling curve, (ii) numerical results, obtained through finite element analyses, and (iii) test results carried by Y.Q. Wang, H.X. Yuan, Y.J. Shi e M. Cheng [1]. It is shown that a significant scatter is obtained with the EC9 curve but, in sharp contrast, a small scatter is obtained with the numerical and test results. Finally, it is demonstrated that the numerical results yield resistance values significantly below (above) the EC9 ones for small (high) slenderness values.

Keywords: aluminum beams, I-sections, lateral-torsional buckling, , Eurocode 9, elastoplastic buckling

Índice de texto

1. Introdução.....	1
1.1 Motivação e Enquadramento	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Estrutura e Organização	2
2. Apresentação do alumínio	3
2.1 História do alumínio	3
2.2 Características do alumínio	3
2.2.1 Características gerais.....	4
2.3 Ligas de alumínio	7
2.3.1 Identificação e caracterização dos diferentes tipos de ligas de alumínio	8
2.4 Ligações	9
2.5 Alumínio vs Aço	10
2.6 Campos de aplicação estrutural	13
2.7 Sustentabilidade.....	15
2.8 Relação tensão-deformação.....	15
2.9 Zonas afetadas pelo calor	17
2.10 Tensões residuais devido às soldaduras	19
2.11 Imperfeições geométricas.....	21
2.11.1 Perfis extrudidos.....	21
2.11.2 Perfis soldados.....	22
2.12 Encurvadura de vigas	23
3. Verificação da segurança de vigas de alumínio de acordo com o EC9.....	25
3.1 Verificação da segurança de vigas de alumínio sujeitas a flexão simples.....	28
3.1.1 Classificação das secções	28
3.1.2 Resistência à flexão	31
3.1.3 Resistência ao esforço transversal.....	31
3.1.4 Interação entre momento fletor e esforço transversal.....	32
3.1.5 Resistência da alma às cargas transversais	33
3.1.6 Encurvadura lateral.....	35
4. Determinação da resistência à encurvadura lateral de vigas de alumínio, com base em cargas críticas elastoplásticas	39
4.1 Introdução.....	39
4.2 Programa de cálculo automático	39
4.2.1 Cálculo Elastoplástico	41

4.2.2 Cálculo Elástico.....	43
4.3 Estudo paramétrico.....	46
4.3.1 Análise 1.....	48
4.3.2 Análise 2.....	53
5. Análise numérica pelo método dos elementos finitos	57
5.1 Introdução.....	57
5.2 Modelos e metodologia	57
5.3 Modelos numéricos	59
5.4 Resultados Numéricos.....	62
5.5 Aplicação da metodologia aos resultados experimentais obtidos por Y.Q. Wang et al[1]	72
6. Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	77
6.1 Conclusões	77
6.2 Desenvolvimentos futuros	78
7. Bibliografia	79
8. Rotinas criadas no MATLAB.....	81
A Classificação das secções transversais	81
B Construção das curvas de encurvadura.....	84
C Cálculo do raio de curvatura.....	91
D Alteração do cálculo do Momento crítico de modo a ter e conta as condições de apoio das vigas que serviram de modelos aos ensaios de Y.Q. Wang et al. [1]	91

Índice de Figuras

Figura 2.1. Efeito do endurecimento em função da percentagem do material adicionado [6]	7
Figura 2.2. Comparação entre a resistência á corrosão do alumínio e do aço [9]	12
Figura 2.3. Evolução do rácio custo do alumínio/custo do aço [11]	13
Figura 2.4. Rio centro, Rio de Janeiro, Brasil [13].....	13
Figura 2.5. Kanazawa station, Kanazawa, Japão [14]	13
Figura 2.6. Ekofisk 2/4 L, Mar do Norte [15]	14
Figura 2.7. Ekofisk, Mar do Norte [15].....	14
Figura 2.8. Curvas típicas tensão-deformação entre um aço macio e uma liga de alumínio [17]	15
Figura 2.9. Classe de encurvadura A e B [20].....	16
Figura 2.10. Relação tensão-deformação para a classe A (n=25) e B (n=5) [17]	17
Figura 2.11. Diminuição da resistência na zona de soldadura [6]	18
Figura 2.12. Redução da tensão última nas zonas de soldaduras [20].....	18
Figura 2.13. Área de influência da zona afetada pelo calor [18].....	19
Figura 2.14. Tensões residuais num perfil em T soldado [20]	20
Figura 2.15. Tensões residuais em perfis em I soldados [20].....	20
Figura 2.16. Curvatura inicial de uma viga [20]	21
Figura 2.17. Alteração da espessura de uma secção vazada [20]	22
Figura 2.18. Curvaturas iniciais do banzo e da alma [20]	23
Figura 2.19. Encurvadura de uma viga [20]	23
Figura 3.1. Definição do tipo de elementos constituintes da secção transversal [18]	29
Figura 3.2. Valores de η e ψ [18]	30
Figura 3.3. Interação entre a resistência ao esforço transversal e a resistência à flexão [18].....	33
Figura 3.4. Tipo de carregamentos e coeficientes de encurvadura [18]	35
Figura 4.1. Secção transversal em I.....	40
Figura 4.2. Dupla simplificação de simetria considerada.....	40
Figura 4.3. Discretização da secção transversal	41
Figura 4.4. Função de empenamento para uma viga em I [20]	42
Figura 4.5. Curva elástica (EC9)	44
Figura 4.6. Curva da coluna ideal (Euler)	44
Figura 4.7. Fluxograma da rotina em MATLAB	45
Figura 4.8. Curvas tensão-deformação das ligas seleccionadas.....	47
Figura 4.9. Variação do módulo tangente, E_t	48
Figura 4.10. Curvas de dimensionamento das ligas de classe A - Secção em H.....	49
Figura 4.11. Curvas de dimensionamento das ligas de classe B - Secção em H.....	50
Figura 4.12. Curvas de dimensionamento para a secção em H	50
Figura 4.13. Curvas de dimensionamento das ligas de classe A - Secção em I	51
Figura 4.14. Curvas de dimensionamento das ligas de classe B - Secção em I.....	51
Figura 4.15. Curvas de dimensionamento para a secção em I.....	52
Figura 4.16. Curvas de dimensionamento para as secções em H e I.....	53
Figura 4.17. Curvas de dimensionamento para a liga 6060 T6 da classe A.....	54
Figura 4.18. Curvas de dimensionamento para a liga 6063 T6 da classe A.....	54
Figura 4.19. Curva de encurvadura para a liga 5083 H12 da classe B.....	55
Figura 4.20. Curva de encurvadura para a liga 5083 H111 da classe B.....	55
Figura 5.1 Simplificação de simetria considerada.....	59
Figura 5.2. Viga com imperfeição geométrica (exagerada)	59
Figura 5.3. Raio de curvatura, R	60

Figura 5.4. Lei material para a liga 6060 T6 da classe A	60
Figura 5.5. Lei material para a liga 6063 T6 da classe A	61
Figura 5.6. Lei material para a liga 5083 H12 da classe B	61
Figura 5.7. Lei material para a liga 5083 H111 da classe B	61
Figura 5.8. Carregamento na secção de extremidade	62
Figura 5.9. Deformada-tipo no colapso	63
Figura 5.10. Gráfico carga – deslocamento tipo (segundo y)	63
Figura 5.11. Deformada no colapso para os modelos com grandes rotações	63
Figura 5.12. Gráfico carga – deslocamento (segundo y), para os modelos com grandes rotações	64
Figura 5.13. Resultados numéricos da liga 6060 T6 para a secção 1	64
Figura 5.14. Resultados numéricos da liga 6060 T6 para a secção 2	65
Figura 5.15. Resultados numéricos da liga 6063 T66 para a secção 1	66
Figura 5.16. Resultados numéricos da liga 6063 T66 para a secção 2	66
Figura 5.17. Resultados numéricos da liga 5083 H12 para a secção 1	67
Figura 5.18. Resultados numéricos da liga 5083 H12 para a secção 2	68
Figura 5.19. Resultados numéricos da liga 5083 H111 para a secção 1	68
Figura 5.20. Resultados numéricos da liga 5083 H111 para a secção 2	69
Figura 5.21. Resultados numéricos “elásticos” para a secção 1	70
Figura 5.22. Resultados numéricos “elásticos” para a secção 2	70
Figura 5.23. Resultados numéricos “elastoplásticos” para a secção 1	71
Figura 5.24. Resultados numéricos “elastoplásticos” para a secção 2	71
Figura 5.25. Lei material para a liga 6061 T6 [1]	72
Figura 5.26. Lei material par a liga 6063 T5 [1]	73
Figura 5.27. Comparação dos resultados “elásticos” para a secção 1	75
Figura 5.28. Comparação dos resultados “elásticos” para a secção 2	75
Figura 5.29. Comparação dos resultados “elastoplásticos” para a secção 1	76
Figura 5.30. Comparação dos resultados “elastoplásticos” para a secção 2	76

Índice de Tabelas

Tabela 2.1. Grupos das ligas de alumínio [8]	8
Tabela 2.2. Propriedades físicas do alumínio e do aço [10]	10
Tabela 2.3. Exemplo de equivalência de secções em alumínio e aço em termos de rigidez [10]	11
Tabela 3.1. Características das ligas de alumínio - Perfis extrudidos [18].....	26
Tabela 3.2. Características das ligas de alumínio – Chapas [18]	27
Tabela 3.3. Valores dos parâmetros de esbelteza, β [18]	30
Tabela 3.4. Valores do fator de forma, α [18]	31
Tabela 4.1. Características das ligas selecionadas.....	46
Tabela 4.2. Secções transversais usadas na análise 1	48
Tabela 4.3. Características das ligas selecionadas na análise (2)	53
Tabela 4.4. Características dos modelos escolhidos para a classe A e B	53
Tabela 5.1. Características das ligas selecionadas para a análise numérica	57
Tabela 5.2. Características das secções escolhidas	57
Tabela 5.3. Coeficientes de redução obtidos com o ADINA, para a liga 6060 T6 com secção 1	64
Tabela 5.4. Coeficientes de redução obtidos com o ADINA, para a liga 6060 T6 com secção 2.....	65
Tabela 5.5. Coeficientes de redução obtidos com o ADINA, para a liga 6063 T66 com secção 1	65
Tabela 5.6. Coeficientes de redução obtidos com o ADINA, para a liga 6063 T66 com secção 2.....	66
Tabela 5.7. Coeficientes de redução obtidos com o ADINA, para a liga 5083 H12 com secção 1	67
Tabela 5.8. Coeficientes de redução obtidos com o ADINA, para a liga 5083 H12 com secção 2	67
Tabela 5.9. Coeficientes de redução obtidos com o ADINA, para a liga 5083 H111 com secção 1	68
Tabela 5.10. Coeficientes de redução obtidos com o ADINA, para a liga 5083 H111 com secção 1 ..	69
Tabela 5.11. Características físicas dos modelos ensaiados [1]	72
Tabela 5.12. Parâmetros geométricos das vigas da liga 6061 T6 [1]	73
Tabela 5.13. Parâmetros geométricos das vigas da liga 6063 T5 [1]	73
Tabela 5.14. Resultados obtidos para a liga 6061 T6.....	74
Tabela 5.15. Resultados obtidos para a liga 6063 T5.....	74

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Abreviaturas

EC9 – Eurocódigo 9

Siglas

UNL – Universidade Nova de Lisboa

HAZ – Heat Affected Zone (zona afetada pelo calor)

ECCS – European Convention for Constructional Steelwork

Símbolos

A_v	área de corte
α	fator de forma
α_{LT}	fator de imperfeição
b	largura do elemento
b_1	distância entre o banzo carregado e o travamento lateral
b_f	largura do banzo
b_{haz}	comprimento da HAZ
β	parâmetro de esbelteza
χ_f	fator de redução devido á encurvadura local
χ_{LT}	fator de redução da resistência devido á encurvadura lateral
d	diâmetro dos furos no plano de corte
EI_y	rigidez segundo a direção y
EI_w	rigidez de empenamento
EI_z	rigidez segundo a direção z
ε	extensão
F_{Ed}	esforço transversal
f_{of}	tensão característica do material constituinte do banzo
f_{ow}	tensão característica do material que constitui a alma
F_{Rd}	resistência da alma á compressão
γ_{m1}	coeficiente parcial de segurança para secções transversais
γ_{m2}	coeficiente parcial de segurança para secções transversais sujeitas á tensão última
G	módulo de distorção
h	altura da secção
h_w	comprimento da alma
I_y	inércia relativamente ao eixo y
I_t	inércia de torção
I_w	constante de empenamento
I_z	inércia relativamente ao eixo z
J	fator de rigidez à torção
k_F	rigidez dos banzos
$\bar{\lambda}_{LT}$	esbelteza devido à encurvadura lateral
$\bar{\lambda}_{0,LT}$	esbelteza limite
$\bar{\lambda}_{el}$	esbelteza elástica

$\bar{\lambda}_{ep}$	esbelteza elastoplástica
L	distância entre travamentos laterais
L_{eff}	comprimento efetivo
l_y	comprimento efetivo tendo em conta a extensão da ação das cargas, s_s
M_{cr}	momento crítico
M_{Ed}	valor de cálculo do momento atuante momento atuante
$M_{f,Rd}$	momento resistente dos banzos
$M_{pl,Rd}$	momento resistente plástico
M_{Rd}	valor de cálculo do momento fletor resistente
n	número de almas.
n_p	expoente da Lei de Ramber-Osgood
R	raio
σ	tensão
t	espessura do elemento
t_w	espessura da alma
ν	coeficiente de Poisson
V_{Ed}	valor de cálculo do esforço transversal atuante na secção
V_{Rd}	valor de cálculo do esforço transversal resistente da secção
ψ	rácio entre as tensões na extremidade da parede em relação à maior tensão de compressão
η	coeficiente do gradiente de tensão
W_{el}	módulo de flexão elástico da secção
W_{net}	módulo de flexão elástico da secção considerando os furos e a HAZ
W_{pl}	módulo de flexão plástico

Capítulo 1

1. Introdução

1.1 Motivação e Enquadramento

Apesar de ser o metal mais abundante na crosta terrestre e o terceiro elemento mais abundante no planeta, o alumínio possui uma história maioritariamente recente, tendo sido descoberto apenas no início do século XIX [2].

A dificuldade em obter alumínio na forma metálica usada amplamente nos dias de hoje adiou a sua entrada no nosso quotidiano. Porém, as suas características únicas, garantiram-lhe um lugar privilegiado entre os metais com maior procura, ficando apenas atrás do aço [2].

Grande parte das aplicações em alumínio são executadas com recurso a ligas de alumínio que resultam da adição de outros elementos e que podem ter diversas características, consoante a adição, o que o torna um metal extremamente versátil.

O facto de ser um material extremamente versátil garantiu ao alumínio um uso extensivo nas mais diferentes áreas, sendo exaustivamente usado em embalagens, nos transportes aéreos, marítimos e terrestres, utensílios do quotidiano doméstico, na construção civil e, mais recentemente, em elementos estruturais [2,3]. Na verdade, tem-se observado um crescimento notável do uso de alumínio no panorama estrutural, o que se deve maioritariamente ao facto de apresentar um bom rácio peso/resistência (entre outras características que serão abordadas com um maior detalhe no capítulo 2), sendo cerca de três vezes mais leve do que o aço, tornando-o um material bastante atrativo e com uso preferencial em estruturas como coberturas, pontes móveis, heliportos e estruturas offshore [3].

Com a generalização das aplicações estruturais recorrendo ao alumínio nas últimas décadas, a necessidade da criação de um regulamento atual tornou-se primordial. Em 2007 foi lançado o Eurocódigo 9 (EN1999-1-1:2007 ou simplificado EC9), que contém um conjunto de regras detalhadas relativas à verificação da segurança de estruturas de alumínio, sublinhando a importância do mesmo como material estrutural.

1.2 Objetivos

O ponto de partida da presente Dissertação é o trabalho de Pena [4] relativo ao comportamento à encurvadura de colunas de alumínio. Neste trabalho foi concluído que existem vantagens significativas em adotar um cálculo baseado numa esbelteza “elastoplástica”, isto é, uma esbelteza calculada com base na carga crítica elastoplástica da coluna, a qual tem em conta as propriedades não-lineares do material. Em particular: (i) torna-se desnecessário ter em conta a classe do material e, portanto, apenas

é necessário considerar uma única curva de dimensionamento e (ii) a determinação da carga crítica elastoplástica permite obter uma melhor percepção do comportamento não-linear da coluna

A presente Dissertação constitui um desenvolvimento do trabalho anterior, sendo inteiramente dedicada a estudar a utilização da referida metodologia no caso da encurvadura lateral de vigas de alumínio com secção em I.

1.3 Estrutura e Organização

A presente Dissertação é estruturada em seis capítulos, sendo o atual dedicado ao enquadramento do trabalho, apresentando o alumínio como um material estrutural bastante versátil, a definição dos objetivos propostos e à apresentação da estruturação deste trabalho.

Capítulo 1. Introdução – Apresenta os objetivos e o enquadramento da dissertação

Capítulo 2. Apresentação do alumínio como material estrutural: história e principais características

Capítulo 3. Verificação da segurança de vigas de alumínio segundo o EC9

Capítulo 4. Determinação da resistência à encurvadura lateral de vigas de alumínio, com base em cargas críticas elastoplásticas: Procedimento de cálculo com recurso ao MATLAB

Capítulo 5. Análise numérica pelo método dos elementos finitos – Análise através do programa de elementos finitos, ADINA

Capítulo 6. Conclusões e desenvolvimentos futuros: Análise dos resultados do trabalho realizado e conclusões

Capítulo 2

2. Apresentação do alumínio

2.1 História do alumínio

O alumínio é um elemento químico metálico que apresenta um estado sólido à temperatura ambiente e que provém maioritariamente da bauxite [2].

A sua descoberta apenas data do início do século XIX, em 1808, por Sir Humphrey Davy. Foram necessários dezassete anos para que os primeiros pedaços de alumínio fossem produzidos, o que se deve ao Dinamarquês Hans Christian Oersted. Dois anos depois, o alemão Friedrich Wohler conseguiu isolar pó de alumínio e, em 1845, determinar a sua densidade, constatando assim a sua elevada leveza [2].

As principais razões da tardia descoberta do alumínio assentam no facto deste material, no seu estado natural, não apresentar uma estrutura metálica isolada, sendo frequentemente encontrado combinado com o oxigénio e outros elementos em rochas, argilas, solos e vegetação, bem como o facto de ser um elemento extremamente reativo, o que dificulta o seu processo de extração [2,5].

Até cerca de 1855, as dificuldades em obter alumínio em quantidades significativas tornaram-no num metal de valor comercial superior ao ouro e à platina, o que lhe conferiu a denominação de: “o novo material precioso”. A verdadeira revolução no processo de produção deu-se em 1886, quando o francês Paul Louis Toussaint Héroult e o norte-americano Charles Martin Hall desenvolveram um método, hoje apelidado de “Método de Hall Héroult”, que potenciou a produção de alumínio resultando na queda acentuada do seu valor de mercado. Posteriores refinamentos do método permitiram sucessivos incrementos da taxa de produção, abrindo novos horizontes à sua aplicação nas mais diversas áreas, o que levou a que o alumínio se tornasse um dos metais mais usados a nível global nas mais distintas áreas, apenas atrás do aço [3].

2.2 Características do alumínio

Dotado de características mecânicas e químicas singulares, o alumínio possui aplicações inigualáveis no mundo dos metais, sendo extremamente versátil e amplamente usado em áreas como a aeroespacial, a aeronáutica e automóvel, transportes ferroviários e marítimos, construção civil, entre muitas outras [3].

Não estamos, porém, perante um material perfeito. No seu estado puro, o alumínio não apresenta uma resistência mecânica notável. No entanto, o uso de ligas de alumínio, através da adição de outros elementos, pode levar a um aumento significativo da resistência das ligas de alumínio até níveis semelhantes aos de algumas ligas de aço [2,6]. Esta temática será abordada posteriormente no ponto 2.3 do presente capítulo.

2.2.1 Características gerais

O sucesso do alumínio no ramo da construção civil, competindo com o aço em algumas aplicações estruturais, apenas é possível tirando partido das suas características físicas, do processo de produção e da tecnologia associada ao material. Em particular, as ligas de alumínio podem ser economicamente competitivas em virtude das seguintes propriedades [3, 5, 7]:

(1) Elevado rácio entre a resistência e peso

- Permite satisfazer os requisitos estruturais minimizando o peso próprio;
- O baixo peso próprio facilita o transporte de grandes peças pré-fabricadas;
- O peso reduzido permite um melhor manuseamento e transporte, o que resulta numa maior comodidade nos trabalhos a realizar em obra, numa minoração dos recursos na fase de montagem e num menor risco de acidentes de trabalho.

(2) Durabilidade/Resistência à corrosão

- As ligas de alumínio são praticamente imunes às condições atmosféricas pois possuem elevada resistência à corrosão e aos efeitos dos raios ultravioletas;
- Baixa necessidade manutenção: o alumínio mesmo quando não tratado, não necessita de manutenção, o que se concretiza numa vantagem económica a médio/longo prazo.

(3) Flexibilidade

- Possibilidades arquitetónicas inovadoras;
- Os elementos em alumínio podem ser serrados, furados, rebitados, aparafusados, dobrados, colados ou soldados em armazém ou em obra.

(4) Funcionalidade estrutural

O processo de extrusão permite:

- A possibilidade de escolha de secções transversais que garantam o melhor rácio entre o peso e a eficiência estrutural;
- A obtenção de uma infinidade de formas e secções
- Evitar o uso de ligações entre componentes (devido á possibilidade de fabrico de praticamente qualquer secção rígida);

(5) Não é combustível

- O Alumínio não arde e é, portanto, classificado como um material não combustível (classe A1);
- As ligas atingem o ponto de fusão por volta dos 650°C sem soltar gases prejudiciais.

(6) Refletividade

- Ao instalar coletores solares em alumínio é possível diminuir o consumo energético que advém da luz artificial e dos aquecimentos no inverno ou então reduzir a necessidade de recorrer a sistemas de ar condicionado no verão através do uso de dispositivos de sombreamento.

(7) Reciclabilidade

- 100% reciclável, sem perdas de qualidade;
- Apenas é necessário 5% da energia de produção do alumínio no seu processo de reciclagem.

Por outro lado, um dimensionamento cuidado de estruturas em alumínio pode ser conseguido não só tirando partido das vantagens do seu uso, mas através da mitigação das suas desvantagens, nomeadamente:

(1) Reduzido módulo de elasticidade

- Obriga a um dimensionamento mais cuidado e exigente, relativamente ao controlo de deslocamentos e efeitos de segunda ordem

(2) Suscetibilidade às elevadas temperaturas

- Pouco resistente a temperaturas elevadas, sendo necessária especial atenção às áreas adjacentes, as quais sofrem diminuições de resistência consideráveis

(3) Maior custo por unidade de peso

- Custo superior ao aço, o que implica um dimensionamento muito otimizado e funcional das secções e elementos a usar

Há ainda que referir as seguintes propriedades físicas e químicas

(1) Densidade

A diminuição do peso estrutural é uma das principais razões da utilização do alumínio, facto que leva a que a sua densidade seja uma das suas melhores características físicas: o alumínio possui uma densidade de $2,7 \text{ g/cm}^3$ [6].

(2) Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade, E , do alumínio é aproximadamente igual a 70 GPa.

(3) Módulo de distorção

O módulo de distorção, G , ronda os 27 MPa, um reduzido.

(4) Resistência à corrosão

Quando exposto ao ar, o alumínio reage com o oxigénio e o vapor de água, formando uma camada de 1nm de espessura de óxido, que serve de proteção contra o desgaste provocado pela exposição à generalidade dos ambientes. Ao contrário do que acontece com o ferro, a película de óxido formada na superfície do alumínio não provoca ferrugem [2, 5, 6].

(5) Coeficiente de expansão térmica linear

Possui um coeficiente de expansão térmica linear, α igual a $24 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, que pode ser relevante em estruturas em que é necessária uma dilatação térmica livre [6].

(6) Condutividade elétrica

Com uma resistência elétrica específica reduzida, $2,65 \times 10^{-8} \Omega.m$, o alumínio é um bom condutor elétrico. Esta característica, aliada ao seu baixo peso, e um custo reduzido, quando comparado com o cobre, faz do alumínio o material condutor usado em torres de alta tensão [3].

(7) Refletividade

Sem ser polido, apresenta uma refletividade de 71% e cerca de 96% quando polido, sendo um dos materiais com refletividade mais elevada, sendo por essa razão, usado frequentemente em LEDS [3].

(8) Ductilidade e maleabilidade

O alumínio apresenta uma ductilidade e maleabilidade elevada o que o torna muito versátil, podendo ser usado nas mais diversas formas, desde folhas até fios [3].

2.3 Ligas de alumínio

Como foi anteriormente referido, no seu estado puro, o alumínio não apresenta boa resistência mecânica, sendo o valor da tensão limite de proporcionalidade aproximadamente 10 MPa e da tensão resistente à tração cerca de 40 MPa. [6]. Porém, quando se combina o alumínio com outros materiais, como o magnésio, a resistência pode atingir valores semelhantes aos de algumas ligas de aço. A maioria das aplicações de alumínio envolve o uso de ligas e não o seu estado puro.

O aumento de resistência das ligas é conseguido através de alterações na estrutura do alumínio, o que resulta numa perda de ductilidade, e, consequentemente, num aumento da resistência [2, 5].

A relação entre o endurecimento da liga e a percentagem do material adicionado não é de todo linear, como se pode verificar na Figura 2.1.

Através da análise da Figura 2.1 pode concluir-se que o magnésio é o elemento que, quando combinado com o alumínio, produz as ligas com maiores resistências, o que levou a que, no passado, as ligas alumínio-magnésio fossem as mais usadas no panorama estrutural. No entanto, estas ligas não apresentavam uma resistência à corrosão aceitável, o que levou à utilização de ligas com magnésio e manganês, menos resistentes mas com uma boa resistência à corrosão [6].

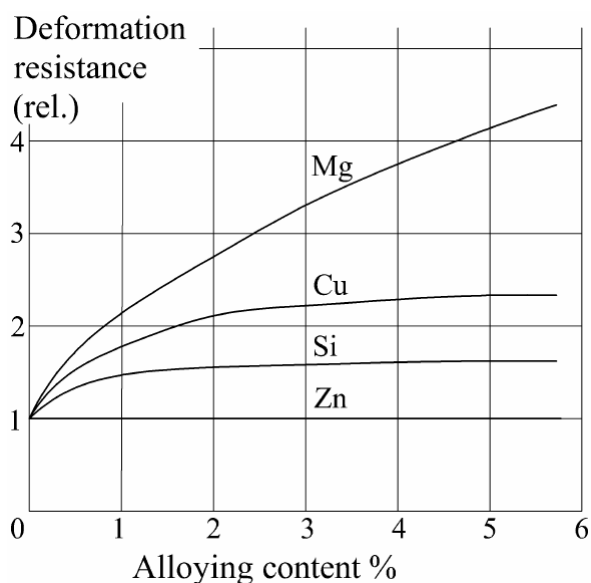


Figura 2.1. Efeito do endurecimento em função da percentagem do material adicionado [6]

A adição de diferentes elementos nas ligas de alumínio provoca diferentes efeitos, consoante o elemento adicionado. Assim, a liga a utilizar depende do propósito a que se aplica. O elevado número de ligas disponíveis e a variabilidade das suas características tornaram crucial a criação de um sistema global de caracterização e identificação.

2.3.1 Identificação e caracterização dos diferentes tipos de ligas de alumínio

Presentemente existem dois sistemas distintos de classificação das referidas ligas: um que utiliza 4 dígitos e um outro de 3 dígitos e um decimal [2, 8]. Ao longo desta dissertação apenas se utiliza a primeira classificação.

O primeiro dígito do sistema de 4 dígitos representa o elemento adicionado, em maiores percentagens e é o algarismo usado para identificar o grupo da liga.

Tabela 2.1. Grupos das ligas de alumínio [8]

Grupo	Principal elemento adicionado
1XXX	Alumínio com 99% de pureza mínima
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros elementos

O segundo dígito, se diferente de 0, indica uma modificação na liga, enquanto os terceiro e quarto dígitos servem apenas para fazer distinção entre diferentes ligas do mesmo grupo. A única exceção corresponde ao grupo 1XXX, onde os últimos 2 dígitos indicam a percentagem de alumínio presente na liga acima dos 99%: a liga 1050 apresenta uma percentagem de 99,50% de alumínio [8].

Cada grupo apresenta um conjunto de características únicas:

Grupo 1XXX – Ligas constituídas maioritariamente por alumínio (acima dos 99%) resultando em fracas características mecânicas mas boa resistência à corrosão, sendo por isso pouco usadas no âmbito estrutural. Não são tratadas a quente [8].

Grupo 2XXXX – Ligas tratadas a quente e que podem atingir boas resistências mecânicas, o que implica um bom rácio resistência/peso. Possuem boa resistência à fadiga, mas uma má resistência à corrosão. Apresentam uma má resposta aos processos de soldadura. Estão, de momento, em estudo e avaliação com vista à sua utilização em aviação e aplicações aeroespaciais [8].

Grupo 3XXXX – Ligas de resistência média e boa resistência à corrosão. Possuem uma alta resistência a temperaturas elevadas, sendo por isso usadas em situações onde a resistência a temperaturas significativas seja preponderante. Não são tratadas a quente [8].

Grupo 4XXXX – Ligas que apresentam um baixo ponto de fusão devido à adição de silício. São usadas maioritariamente nas soldaduras e como ligas de enchimento. São ligas que podem ou não ser tratadas a quente, dependendo dos materiais adicionados [8].

Grupo 5XXXX – São as ligas que apresentam maiores resistências entre as ligas não tratadas a quente, podendo ser soldadas. Apresentam resistências elevadas à fadiga e muito boa resistência à corrosão, especialmente em ambientes marítimos [8].

Grupo 6XXXX – Ligas tratadas a quente dotadas de boa resistência mecânica e boa resistência à corrosão. Admitem quase todos os tipos de soldaduras e são amplamente usadas em componentes para aviação. Diferem das ligas do grupo 2XXX por serem menos resistentes mas mais flexíveis [8].

Grupo 7XXXX – Grupo onde se incluem as ligas que apresentam os maiores valores de resistência mecânica, podendo superar algumas ligas metálicas de alta resistência. São tratadas a quente e algumas ligas deste grupo podem apresentar problemas relacionados com soldaduras. São frequentemente usadas em aplicações de alto desempenho (aviação, desportos motorizados de alta competição, etc...) [8].

2.4 Ligações

A diversidade de elementos e ligações disponíveis permitem montar praticamente qualquer tipo de estrutura, desde simples pórticos até estruturas complexas e multifuncionais que se podem montar e desmontar consoante as necessidades impostas. Os métodos de ligação mais comuns são as soldaduras (TIG e MIG, entre outras), as ligações com recurso a fixadores (parafusos ou rebites) e as colagens [9].

(1) Soldaduras

Os principais métodos de execução de soldaduras em alumínio são as soldaduras tipo MIG (Metal Inert Gas) e tipo TIG (Tungsten Inert Gas), existindo, no entanto, outros como a soldadura por fricção, soldadura a laser e a soldadura em arco. As soldaduras do tipo MIG são as mais usadas por terem uma melhor capacidade penetrante (o que permite soldar material mais espesso), uma maior velocidade e facilidade de execução [9].

As soldaduras podem provocar distorções e fendas (ligas que possuem magnésio e silício têm uma maior facilidade em fendilhar) nas peças soldadas, bem como perdas de resistência na própria soldadura e nas zonas adjacentes devido às elevadas temperaturas resultantes do processo de soldar (característica que será abordada posteriormente na secção 2.11) [9].

As principais vantagens do uso de soldaduras consistem na poupança de material e mão-de-obra, na ausência de furos e na possibilidade de não haver sobreposição de material [9].

(2) Ligações com recurso a parafusos e rebites

Ao contrário das soldaduras, as ligações com recurso a parafusos e rebites, não provocam uma diminuição da resistência das peças e podem ser executadas em obra. Este tipo de ligações são geralmente executadas recorrendo a parafusos, (preferencialmente) de alumínio ou aço, ou rebites [9].

(3) Colagens

Consiste na ligação de peças através do uso de um material adesivo que ao reagir, física e quimicamente, com as superfícies das peças garante a sua ligação.

As principais vantagens deste tipo de ligação são: a possibilidade de ligações com ausência de furos e de aquecimento do material no caso do uso de soldaduras, possibilidade de isolamento (dependendo do material adesivo) a diminuição de vibrações (já que o material adesivo, pode absorver vibrações) entre outras. No entanto, é uma solução menos resistente e durável que as anteriores, a adesão é difícil de controlar e podem apresentar problemas na capacidade aderente quando sujeitas a elevadas temperaturas [9].

2.5 Alumínio vs Aço

O alumínio compete diretamente com o aço no que se refere às aplicações estruturais. A verificação da segurança de ambos os materiais é bastante semelhante, pelo que a metodologia presente no EC9 (alumínio) e EC3 (aço) segue os mesmos princípios.

O facto de ambos os materiais desempenharem, geralmente, as mesmas funções, resulta na necessidade de conhecer as vantagens e desvantagens da utilização entre um e outro. A Tabela 2.2 compara as principais características físicas entre o alumínio e o aço.

Tabela 2.2. Propriedades físicas do alumínio e do aço [10]

	Unidades	Alumínio	Aço
Densidade, ρ	kg/m ³	2,7	7,8
Módulo de elasticidade, E	MPa	70	210
Módulo de distorção, G	MPa	27	81
Coefficiente de Poisson, ν	[-]	0,33	0,3
Coefficiente de expansão térmica linear, α	°C ⁻¹	24x10 ⁻⁶	12x10 ⁻⁶

Da análise da tabela 2.4 podem retirar-se as seguintes conclusões:

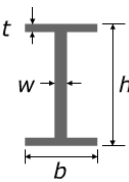




$$a) \quad \rho_{\text{alumínio}} \cong \frac{1}{3} \rho_{\text{aço}}$$

A reduzida densidade do alumínio e, conseqüentemente, o seu peso reduzido, permite um menor carregamento sobre a estrutura comparativamente ao aço. Por outro lado, em aplicações, como por exemplo pontes atirantadas, o uso do alumínio no tabuleiro, levando a uma redução significativa do seu peso (1/3 do peso de um tabuleiro em aço), irá levar á necessidade de menores fundações, cabos e torres, aligeirando toda a estrutura resultando numa construção mais económica [11].

$$b) \quad E_{\text{alumínio}} \cong \frac{1}{3} E_{\text{aço}}$$

Com um módulo de elasticidade cerca de um terço do valor do módulo de elasticidade do aço, o alumínio é significativamente mais suscetível a deformações. Um exemplo clássico é o da flexão de vigas, onde a rigidez, EI , é o critério relevante na determinação da secção a usar. De modo a obter uma rigidez semelhante, entre uma secção de alumínio e aço, é necessário que a inércia da secção de alumínio seja cerca de 3 vezes maior que a inércia da secção em aço [11].

Tabela 2.3. Exemplo de equivalência de secções em alumínio e aço em termos de rigidez [10]

		Steel	Al Alloy	Al Alloy	Al Alloy
					
h	mm	240	240	300	300
b	mm	120	240	200	200
t	mm	9.8	18.3	12.9	13
w	mm	6.2	12	6	4
g	kg m ⁻¹	30.7	30.3	18.4	18.9
Second moment of area	mm ⁴	38.9×10^6	116.6×10^6	116.7×10^6	118.1×10^6
EI	N mm ⁻²	8.17×10^{12}	8.16×10^{12}	8.17×10^{12}	8.27×10^{12}

$$c) \quad G_{\text{alumínio}} \cong \frac{1}{3} G_{\text{aço}}$$

Analogamente ao que acontece com o módulo de elasticidade, o módulo de distorção do alumínio é cerca de 1/3 do módulo de distorção do aço o que significa que as secções em alumínio necessitam um dimensionamento mais rigoroso em relação às secções em aço, no que diz respeito a tensões, deformações e estabilidade de corte (encurvadura lateral) [10].

$$d) \quad \alpha_{\text{alumínio}} \cong 2\alpha_{\text{aço}}$$

Em estruturas onde são impedidos os deslocamentos devido a dilatações térmicas, os esforços resultantes da tentativa de contração e dilatação de estruturas em alumínio, são cerca de 2/3 dos esforços resultantes do mesmo fenómeno em estruturas em aço [4].

Os principais critérios que definem a seleção do alumínio como material estrutural ao invés do aço são [6, 11]:

- Redução do peso ;
- Resistência á corrosão;
- Menor necessidade de manutenção;
- Maior longevidade;
- Redução dos custos (dependendo da aplicação e do projeto).

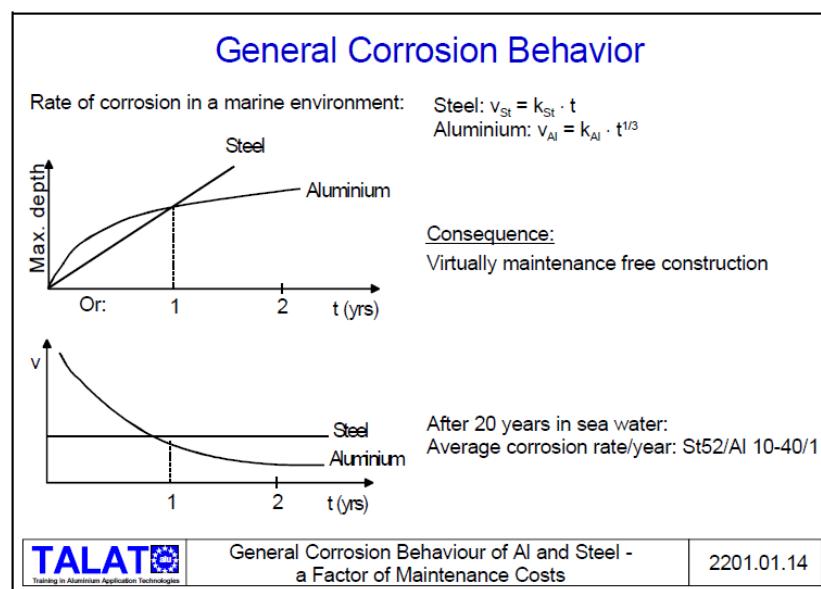


Figura 2.2. Comparação entre a resistência á corrosão do alumínio e do aço [9]

Frequentemente, as secções em aço não são ótimas, já que têm de ser usadas secções padrão que correspondem às secções comercializadas, o que não acontece quando se usam secções em alumínio, já que estas podem ser escolhidas e produzidas para cada caso específico, via extrusão (ver secção 2.2.1) [11].

A Figura 2.3 mostra uma comparação entre o custo do alumínio e do aço, em função da redução de peso conseguida através do uso de ligas de alumínio. Os dois diferentes casos retratados servem apenas a título de exemplo [11].

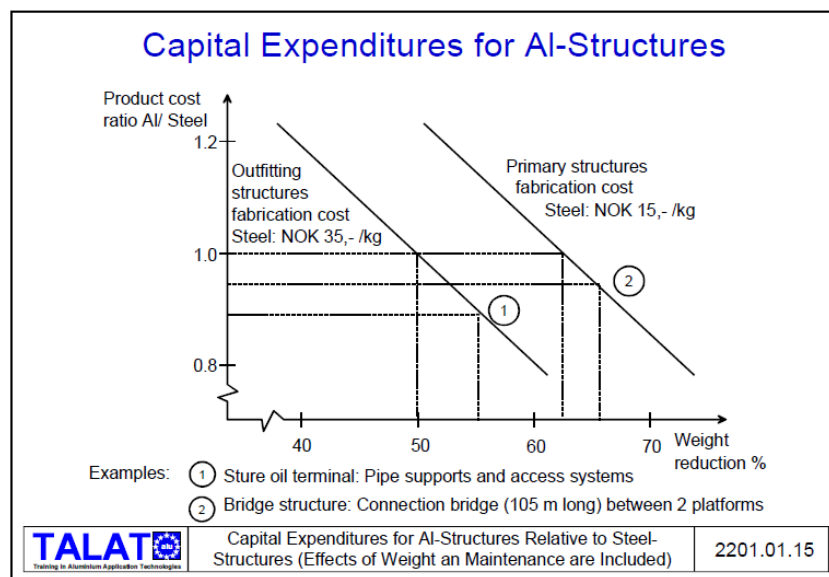


Figura 2.3. Evolução do rácio custo do alumínio/custo do aço [11]

2.6 Campos de aplicação estrutural

Atualmente, vinte por cento da produção mundial de alumínio é usada na construção civil, nomeadamente em acabamentos exteriores e interiores de edifícios. Com efeito, a sua aplicação estrutural tem vindo a crescer nas últimas décadas [12].

As aplicações estruturais onde o uso do alumínio é proeminente são projetadas tirando partido de pelo menos uma das suas principais propriedades, sendo as aplicações mais comuns [3]:

(1) Estruturas de coberturas com grandes vãos onde o peso próprio da estrutura constitui uma parcela da carga atuante, como por exemplo grandes coberturas de piscinas, grandes edifícios públicos e auditórios. A **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** mostra a estrutura da cobertura do centro de convenções, Riocentro, no Rio de Janeiro e a **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** a estrutura da cobertura da estação de Kanazawa no Japão, ambas executadas em alumínio.



Figura 2.4. Rio centro, Rio de Janeiro, Brasil [13]

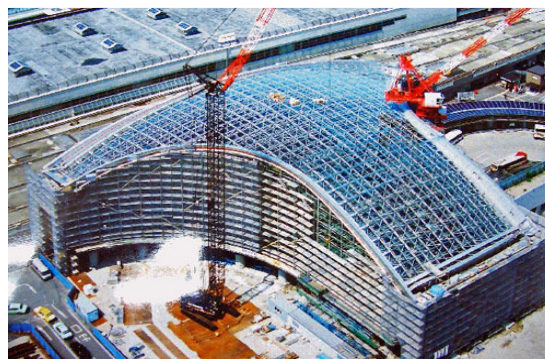


Figura 2.5. Kanazawa station, Kanazawa, Japão [14]

(2) Estruturas localizadas em locais de difícil acesso, em que os custos associados ao transporte e à fase de montagem são muito relevantes.

(3) Estruturas situadas em ambientes húmidos ou corrosivos, como por exemplo cobertura de piscinas, pontes, estruturas hidráulicas, plataformas offshore, etc. A Figura 2.6 mostra a estrutura, em alumínio, do um heliporto do complexo offshore Ekofisk, representado na Figura 2.7, situado no Mar do Norte, em que o alumínio é o material estrutural com maior destaque, tendo sido usadas mais de 300MT de ligas de alumínio em todo o projeto [15].



Figura 2.6. Ekofisk 2/4 L, Mar do Norte [15]



Figura 2.7. Ekofisk, Mar do Norte [15]

(4) Estruturas com peças móveis onde é necessário reduzir o peso próprio, como por exemplo pontes basculantes.

(5) Estruturas onde as operações de manutenção necessitam de ser limitadas, como por exemplo estruturas para-raios, antenas ou postes de iluminação.

2.7 Sustentabilidade

Quando se procura de uma construção sustentável, eficiente e ecológica, o alumínio apresenta-se como um material extremamente atrativo, já que é 100% reciclável, não perdendo as suas características-chave no processo de reciclagem. A contribuir para a sua relevância encontra-se igualmente o reduzido gasto de energia necessário à sua reciclagem que se traduz em apenas 5% da energia usada na sua produção. Todo o processo, da produção à reutilização, é economicamente atrativo e até o seu valor como sucata é elevado. A sua reciclagem permite mesmo cobrir os custos de demolição [2, 16]. Por conseguinte, cerca de 40% do alumínio usado atualmente resulta de material refundido, valor que seria muito superior não fosse a longevidade do produto, o que o torna indisponível para reutilizar durante muitos anos [7].

2.8 Relação tensão-deformação

O alumínio é um material que apresenta um comportamento elastoplástico que, na generalidade das ligas e ao contrário do aço, não apresenta um patamar horizontal proeminente.

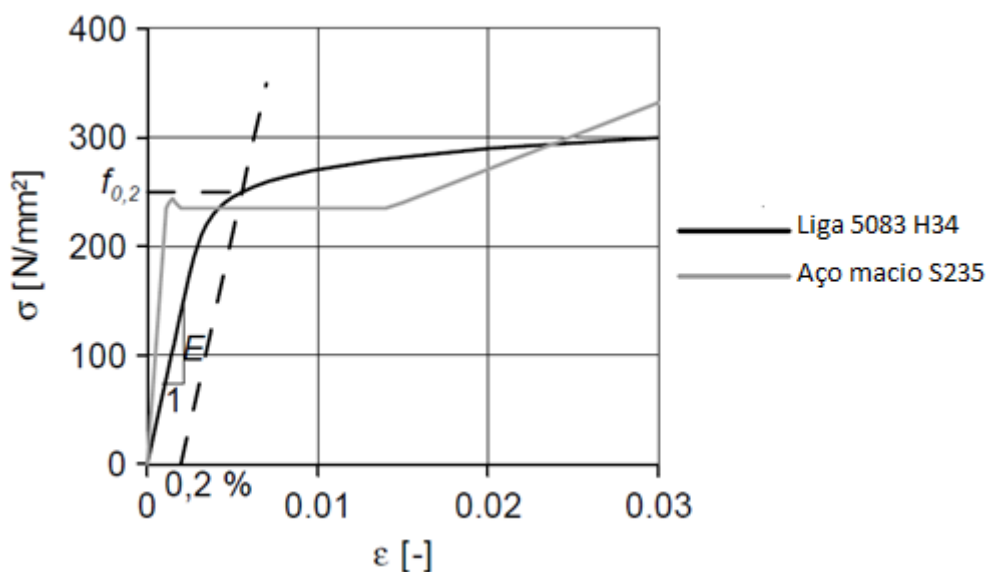


Figura 2.8. Curvas típicas tensão-deformação entre um aço macio e uma liga de alumínio [17]

A influência do processo de fabrico e a sensibilidade às elevadas temperaturas provocam alterações das características mecânicas das ligas que resultam em alterações na relação tensão-deformação [17].

Para definir a lei constitutiva é necessário definir a tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%, $f_{0,2}$, que corresponde à tensão para uma deformação permanente de 0,2%, isto é, $\epsilon = 0,002$, que é considerada, na generalidade dos casos, como a tensão de cedência das ligas.

A tensão de proporcionalidade a 0,1% designa-se por f_p e f_u é a tensão última. Estas propriedades variam de liga para liga [17].

A relação tensão-deformação (ou lei material) é normalmente caracterizada através de um modelo não-linear de Ramberg-Osgood, dado pela expressão [18]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{0,e} \cdot \left(\frac{\sigma}{f_e} \right)^n \quad (2.1)$$

onde:

E representa o módulo de elasticidade na origem

f_e representa o limite elástico convencional

$\varepsilon_{0,e}$ representa a extensão residual correspondente á tensão f_e

n representa o fator de endurecimento

De acordo com o EC9 pode considerar-se como limite elástico convencional:

$$f_e = f_{0,2} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_{0,e} = \varepsilon_{0,2} = 0,002 \quad (2.3)$$

onde

$\varepsilon_{0,2}$ representa a correspondente extensão (0,2%)

No presente trabalho, estudaram-se peças sujeitas a flexão pura, pelo que é importante abordar desde já este caso particular.

Contrariamente ao caso das colunas sujeitas a compressão uniforme, em que a tensão é constante ao longo da secção, para vigas sujeitas à flexão pura, o mesmo não se verifica, já que a tensão varia ao longo da secção, sendo constante ao longo do comprimento da viga.

De acordo com o EC9, as ligas de alumínio dividem-se em duas classes de encurvadura: classe A e classe B. A diferenciação entre a classe A e B reside na proximidade entre os valores de $f_{0,2}$ e f_p .

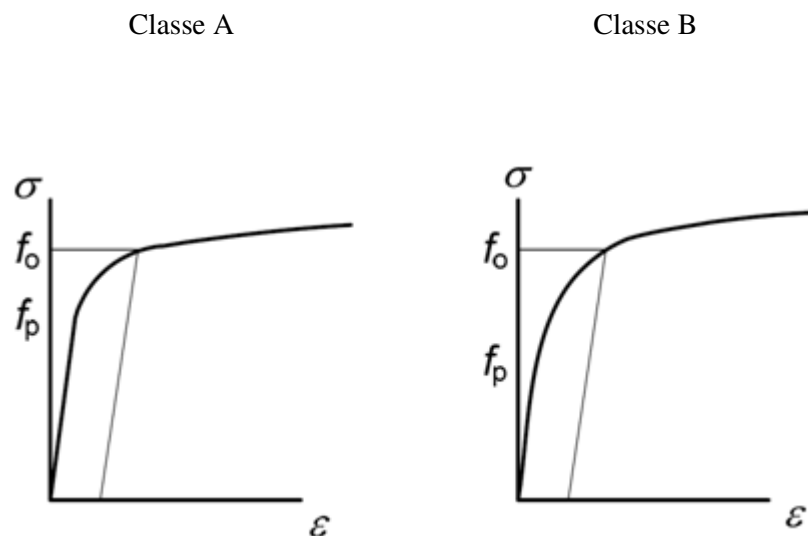


Figura 2.9. Classe de encurvadura A e B [20]

A classe A apresenta um rácio $f_p/f_{0,2}$ elevado ($f_{0,2} \cong f_p$) e valores de n_p entre 20 e 30, enquanto a classe B apresenta um baixo rácio $f_p/f_{0,2}$ ($f_{0,2} > f_p$) e valores de n_p entre 5 e 17.

A generalidade das ligas que apresentam valores de $f_{0,2} \geq 200 \text{ MPa}$, com exceção de algumas ligas da classe 6XXX, pertencem à classe A, ao passo que as ligas que apresentam $f_{0,2} < 200 \text{ MPa}$ pertencem à classe B.

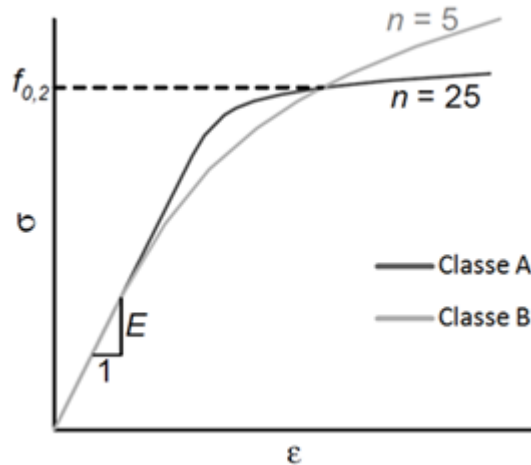


Figura 2.10. Relação tensão-deformação para a classe A (n=25) e B (n=5) [17]

O valor do expoente n presente na lei de Ramberg-Osgood pode servir para diferenciar ligas tratadas e não tratadas a quente [19]:

- | | |
|---------------|-----------------------------|
| $n < 20$ | ligas não tratadas a quente |
| $20 < n < 40$ | ligas tratadas a quente |

2.9 Zonas afetadas pelo calor

A diminuição da resistência devido à ação do calor, resultante da aplicação de soldaduras, é sentida com maior intensidade nos perfis tratados a quente, que pode sofrer uma redução de resistência, da ordem dos 40-50% , como mostra a Figura 2.11 [6].

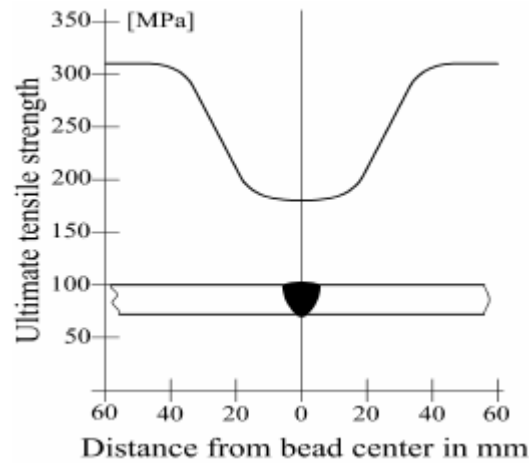


Figura 2.11. Diminuição da resistência na zona de soldadura [6]

Note-se que soldaduras localizadas na ligação alma-banzo conduzem a uma maior redução da resistência, facto que pode ser contrabalançado efetuando as soldaduras numa região menos desfavorável à resistência à flexão. Afastando as soldaduras dos banzos, permite que estes não sejam afetado pelas soldaduras, mitigando assim a perda de resistência da secção, como mostra a Figura 2.12.

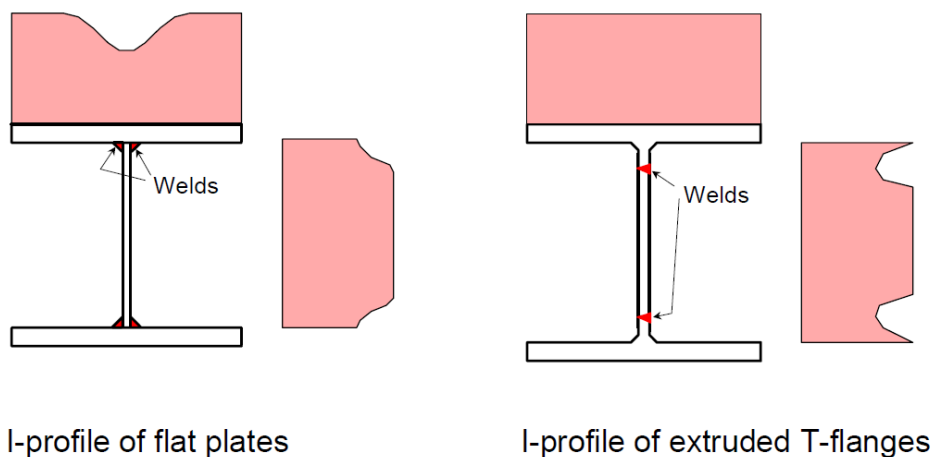


Figura 2.12. Redução da tensão última nas zonas de soldaduras [20]

A área da zona afetada pelo calor estende-se ao longo da secção, como pode ser observado na Figura 2.13.

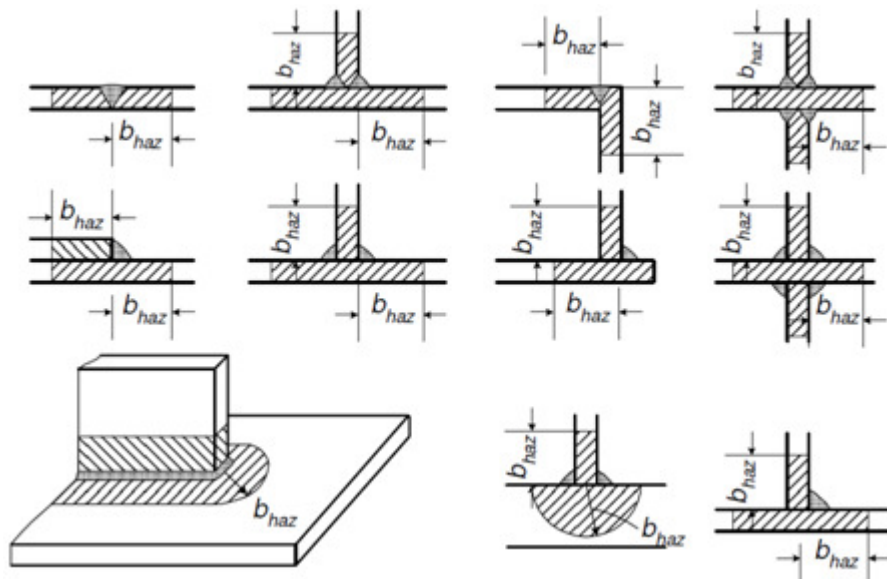


Figura 2.13. Área de influência da zona afetada pelo calor [18]

A distância, ao longo da qual se estende a área afetada pelo calor, b_{haz} , depende do tipo de soldadura. Geralmente, para os processos mais comuns, TIG e MIG, as distâncias são [18]:

- Soldadura do tipo TIG:
 $0 < t \leq 6mm:$ $b_{haz} = 30mm$
- Soldadura do tipo MIG, com temperaturas de arrefecimento até 60°C:
 $0 < t \leq 6mm:$ $b_{haz} = 20mm$
 $6 < t \leq 12mm:$ $b_{haz} = 30mm$
 $12 < t \leq 25mm:$ $b_{haz} = 35mm$
 $t > 25mm:$ $b_{haz} = 40mm$

2.10 Tensões residuais devido às soldaduras

As soldaduras provocam aumentos de temperatura consideráveis na região em redor à da sua aplicação. Ao arrefecer, a soldadura provoca tensões de tração na região da soldadura e tensões de compressão na zona mais próxima.

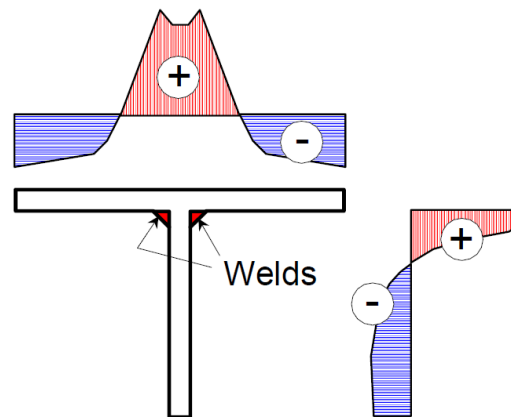


Figura 2.14. Tensões residuais num perfil em T soldado [20]

Em perfis extrudidos, as tensões residuais são distribuídas aleatoriamente ao longo da secção transversal, apresentando valores na ordem dos 20 MPa, para as ações de compressão, e valores irrisórios para ações de tração. Por esta razão, as tensões residuais podem ser desprezadas em perfis extrudidos [20].

Contrariamente ao comportamento descrito para os perfis extrudidos, os perfis soldados apresentam tensões residuais preponderantes. Os valores de tensão característicos rondam os 90-100 MPa para as trações e 30-40 MPa para as compressões, correspondendo os valores mais baixos a ligas tratadas a quente [20].

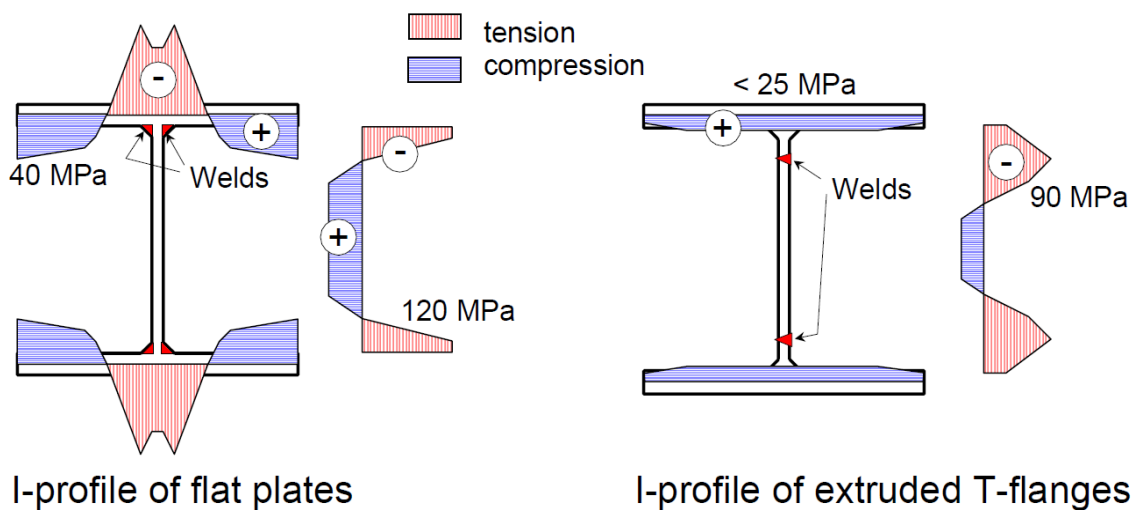


Figura 2.15. Tensões residuais em perfis em I soldados [20]

A análise da Figura 2.15 (figura que resulta de dados obtidos experimentalmente) mostra a influência do uso de soldaduras que resultam em elevadas tensões residuais e uma queda de cerca de metade da resistência nas zonas envolventes aos nós de soldadura [20].

2.11 Imperfeições geométricas

2.11.1 Perfis extrudidos

Os perfis extrudidos apresentam, regra geral, deformações geométricas muito pequenas. No entanto, em caso de risco de instabilidade devido à encurvadura lateral, estas pequenas alterações à geometria das peças não podem ser desprezadas no seu dimensionamento [20]. A importância da consideração deste tipo de imperfeições deve-se ao facto de que, quando uma barra é solicitada à compressão ou flexão, sem ser contraventada, as imperfeições levam a diminuições significativas da resistência à encurvadura [4].

As imperfeições geométricas, em geral, manifestam-se dos seguintes modos:

- Curvatura inicial;
- Variações das dimensões das secções transversais;

2.11.1.1 Curvatura inicial

Regra geral, os perfis de alumínio extrudidos são tracionados com o objetivo de eliminar a curvatura inicial. Embora as imperfeições possam causar uma diminuição da resistência, principalmente à compressão, tracionar os perfis provoca deformações plásticas o que leva também a uma redução das resistências mecânicas [20].

Muito embora uma análise a perfis extrudidos, realizada em diversos países europeus, mostre que a flecha inicial seja aproximadamente $L/2000$, são normalmente considerados, valores mais conservadores: $L/1000 \leq V \leq L/500$. De modo a ter em consideração as imperfeições geométricas dos perfis extrudidos no dimensionamento de vigas de alumínio, a ECCS, European Convention for Constructional Steelwork, recomenda a consideração de um valor para a flecha inicial $L/1000$ [20].

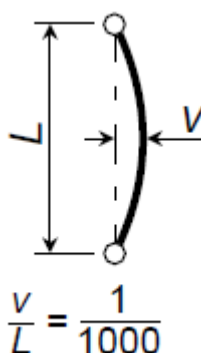


Figura 2.16. Curvatura inicial de uma viga [20]

2.11.1.2 Variações das dimensões das secções transversais

As variações de largura das peças são usualmente inferiores a 1%, ao passo que a espessura dos elementos apresenta uma variação de 5%, e, para elementos de espessura inferior a 5 mm, a variação pode ir até aos 10%. As secções vazadas apresentam diferenças de espessura superiores [20].

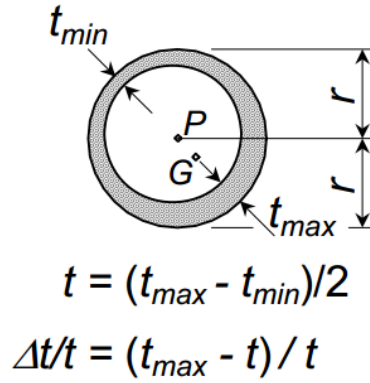


Figura 2.17. Alteração da espessura de uma secção vazada [20]

A alteração da espessura das peças leva a uma excentricidade no que ao seu centro de gravidade diz respeito. Para perfis extrudidos e soldados, testes realizados mostram que esta excentricidade não é superior a $L/1600$ podendo admitir-se então, conservativamente, uma excentricidade $L/1000$ [20].

2.11.2 Perfis soldados

As curvaturas iniciais em vigas soldadas não podem ser evitadas. Para ter em conta com este fenómeno no dimensionamento, são recomendadas as seguintes tolerâncias, caso não sejam necessárias tolerâncias mais restritas, (por razões estéticas entre outras) [20]:

- Para painéis de alma entre reforços laterais [20]:

$$e_w < \frac{b_w}{200} \quad \text{quando: } \frac{b_w}{t_w} \leq 50 \quad (2.4)$$

$$e_w < \frac{b_w^2}{100t_w} \quad \text{quando: } 50 < \frac{b_w}{t_w} < 125 \quad (2.5)$$

$$e_w < \frac{b_w}{80} \quad \text{quando: } \frac{b_w}{t_w} > 125 \quad (2.6)$$

- Por sua vez, a maior curvatura admissível nos banzos em compressão de secções transversais em I, Z e U é definida pelas expressões [20]:

$$e_f < \frac{L_b}{250} \quad \text{quando: } \frac{b_f}{t_f} \leq 1 \quad (2.7)$$

$$e_f < \frac{L_b b_w}{2500t_f} \quad \text{quando: } \frac{b_f}{t_f} > 50 \quad (2.8)$$

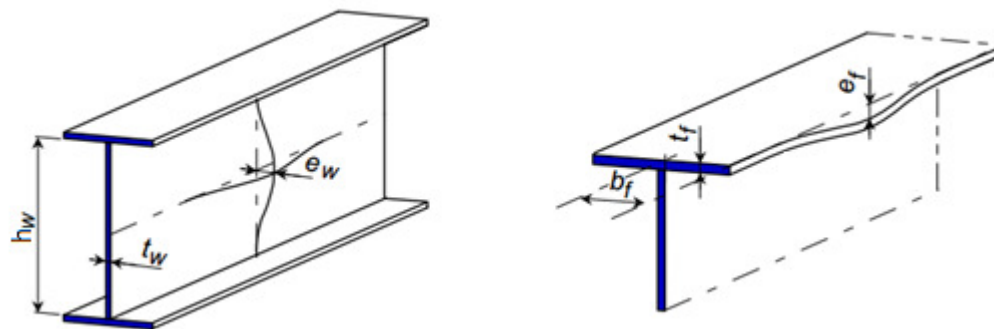


Figura 2.18. Curvaturas iniciais do banzo e da alma [20]

2.12 Encurvadura de vigas

A encurvadura, por flexão-torção em vigas, é um modo de colapso caracterizado por uma deformação, flexão e torção, perpendicular ao plano do carregamento aplicado [20]. A Figura 2.19 mostra a flexão e a encurvadura lateral de uma viga.

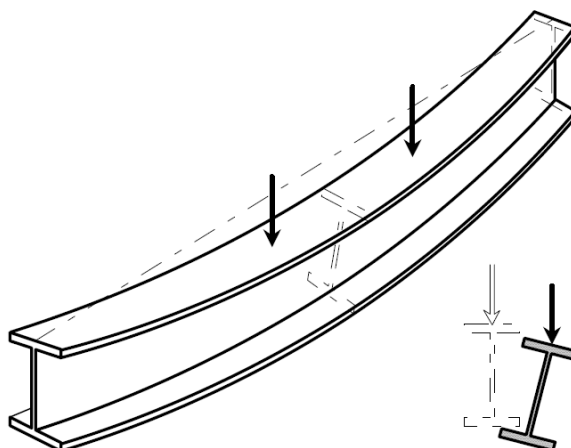


Figura 2.19. Encurvadura de uma viga [20]

O caso de colunas com encurvadura por flexão, flexão-torção e encurvadura local, foi abordado na dissertação que antecede o presente estudo, Pena [4]. Na presente dissertação, analisou-se apenas, o comportamento de vigas aos efeitos da encurvadura lateral, que serão abordados nos capítulos que se seguem.

Capítulo 3

3. Verificação da segurança de vigas de alumínio de acordo com o EC9

Pretende-se no presente capítulo apresentar as regras, propostas pelo EC9, de verificação de segurança de vigas de alumínio. Embora a presente dissertação aborde a temática da encurvadura lateral por flexão-torção, este capítulo apresenta, não só as regras de dimensionamento visando a encurvadura lateral, mas também a verificação de segurança de vigas devido à compressão, ao esforço transversal e à interação flexão-corte, devido à flexão, tendo por base a metodologia do EC9.

Começou-se por compilar, na Tabela 3.1, os valores característicos de f_0 (tensão de cedência), f_u (tensão última), $f_{0,haz}$ (tensão de cedência nas áreas afetadas pelo calor), $f_{u,haz}$ (tensão última nas áreas afetadas pelo calor) e n , para perfis extrudidos. A

Tabela 3.2, por outro lado, refere-se a chapas de alumínio.

Tabela 3.1. Características das ligas de alumínio - Perfis extrudidos [18]

Liga	Têmpera	Espessura [mm]	f_0 [MPa]	f_u [MPa]	$f_{0,haz}$ [MPa]	$f_{u,haz}$ [MPa]	Classe de Encurvadura	n
5083	O/H111, F, H112	$t \leq 200$	110	270	110	270	B	5
	H12/22/32	$t \leq 10$	200	280	135	270	B	14
	H14/24/34	$t \leq 5$	235	300			A	18
6060	T5	$t \leq 5$	120	160	50	80	B	17
		$5 < t \leq 25$	100	140			B	14
	T6	$t \leq 15$	140	170	60	100	A	24
		$t \leq 20$	160	215			A	16
	T64	$t \leq 15$	120	180	60	100	A	12
	T66	$t \leq 3$	160	215	65	110	A	16
		$3 < t \leq 25$	150	195			A	18
6061	T4	$t < 25$	110	180	95	150	B	8
	T6	$t \leq 20$	240	260	115	175	A	55
6063	T5	$t \leq 3$	130	175	60	100	B	16
		$3 < t \leq 25$	110	160			B	13
	T6	$t \leq 25$	160	195	65	110	A	24
		$t \leq 20$	190	220			A	31
	T66	$t \leq 10$	200	245	75	130	A	22
		$10 < t \leq 25$	180	225			A	21
		$t \leq 20$	195	230			A	28
6005A	T6	$t \leq 5$	225	270	115	165	A	25
		$5 < t \leq 10$	215	260			A	24
		$10 < t \leq 25$	200	250			A	20
	T6	$t \leq 5$	215	255			A	26
		$5 < t \leq 10$	200	250			A	20
6106	T6	$t \leq 10$	200	250	95	160	A	20
6082	T4	$t \leq 25$	110	205	100	160	B	8
	T5	$t \leq 5$	230	270	125	185	B	28
	T6	$t \leq 5$	250	290	125	185	A	32
		$5 < t \leq 15$	260	310			A	25
	T6	$t \leq 20$	250	295			A	27
		$20 < t \leq 150$	260	310			A	25
	T6	$t \leq 5$	255	310			A	22
		$5 < t \leq 20$	240	310			A	17
7020	T6	$t \leq 15$	290	350	205	280	A	23
	T6	$15 < t < 40$	275	350			A	19
	T6	$t \leq 20$	280	350			A	18

Tabela 3.2. Características das ligas de alumínio – Chapas [18]

Liga	Têmpera	Espessura [mm]	f_0 [MPa]	f_u [MPa]	$f_{0,haz}$ [MPa]	$f_{u,haz}$ [MPa]	Classe de Encurvadura	n
3004	H14 H24/H34	≤ 6 3	180 170	220	75	155	B	23 18
	H16 H26/H36	≤ 4 3	200 190	240			B	25 20
3005	H14 H24	≤ 6 3	150 130	170	56	115	B	38 18
	H16 H26	≤ 4 3	175 160	195			B	43 24
3103	H14 H24	≤ 25 12,5	120 110	140	44	90	B	31 20
	H16 H26	≤ 4	145 135	160			B	48 28
5005/ 5005 A	O/H111	≤ 50	35	100	35	100	B	5
	H12 H22/H32	$\leq 12,5$	95 80	125	44	100	B	18 11
	H14 H24/H34	$\leq 12,5$	120 110	145			B	25 17
5052	H12 H22/H32	≤ 40	160 130	210	80	170	B	17 10
	H14 H24/H34	≤ 25	180 150	230			B	19 11
5049	O/H111	≤ 100	80	190	80	190	B	6
	H14 H24/H34	≤ 25	190 160	240	100	190	B	20 12
5454	O/H111	≤ 80	85	215	85	215	B	5
	H14 H24/H34	≤ 25	220 200	270	105	215	B	22 15
5754	O/H111	≤ 100	80	190	80	190	B	6
	H14 H24/H34	≤ 25	190 160	240	100	190	B	20 12
5083	O/H111	≤ 50	125	275	125	275	B	6
		$50 < t \leq 80$	115	270	115	270	B	
	H12 H22/H32	≤ 40	250 215	305	155	275	B	22 14
	H14 H24/H34	≤ 25	280 250	340			A	22 14
6061	T4/T451	$\leq 12,5$	110	205	95	150	B	8
	T6/T651	$\leq 12,5$	240	290	115	175	A	23
	T651	$12,5 < t \leq 80$	240	290				
6082	T4/T451	$\leq 12,5$	110	205	125	185	B	8
	T61/T6151	$\leq 12,5$	205	280			A	15
	T6151	$12,5 < t \leq 100$	200	275			A	14
	T6/T651	≤ 6	260	310			A	25
		$6 < t \leq 12,5$	255	300			A	27
	T651	$12,5 < t \leq 100$	240	295			A	21
7020	T6	$\leq 12,5$	280	350	205	280	A	19
	T651	≤ 40						
8011A	H14 H24	$\leq 12,5$	110 100	125	37	85	B	37 22
	H16 H26	≤ 4	120 120	145				33 33

3.1 Verificação da segurança de vigas de alumínio sujeitas a flexão simples

Os casos de estudo da presente dissertação consistem em vigas simplesmente apoiadas sujeitas a flexão simples, isto é, momentos aplicados nas extremidades.

Para elementos sujeitos a flexão, têm de ser efetuadas as seguintes verificações:

- a) Resistência à flexão
- b) Resistência ao esforço transversal
- c) Interação momento fletor-esforço transversal
- d) Compressão na alma
- e) Resistência à encurvadura lateral

3.1.1 Classificação das secções

O Eurocódigo 9 define quatro classes de secções transversais distintas:

Classe 1: Secções que podem formar uma rótula plástica com capacidade de rotação que permite uma análise plástica sem redução da resistência;

Classe 2: Secções que podem atingir o momento plástico resistente mas não têm capacidade de rotação devido à encurvadura local;

Classe 3: Secções em que a tensão na fibra mais comprimida pode atingir f_0 mas em que o fenómeno de encurvadura local impede o desenvolvimento do momento resistente plástico;

Classe 4: Secções onde o fenómeno de encurvadura local se dá, antes de se atingir f_0 .

A classificação das secções depende do rácio entre a largura e a espessura dos seus elementos constituintes sujeitos a compressão, sendo identificados, para a classificação, três tipos de elementos de parede fina:

- a) Elementos exteriores planos
- b) Elementos interiores planos
- c) Elementos interiores curvos

Estes elementos podem ser reforçados, ou não, através de elementos transversais, conforme se pode observar na Figura 3.1.

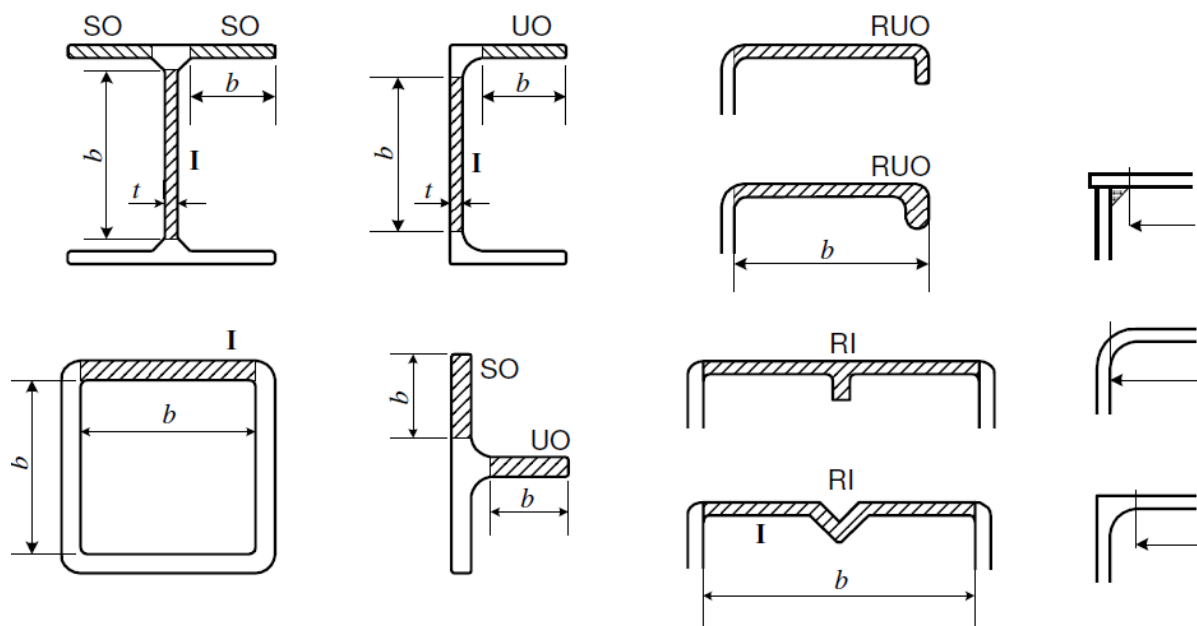


Figura 3.1. Definição do tipo de elementos constituintes da secção transversal [18]

onde

SO *Symetrical Outstand* (elemento externo simétrico)

UO *Unreinforced Outstand* (elemento externo não reforçado)

RUO *Reinforced Unsymetrical Outstand* (elemento assimétrico, externo e reforçado)

I *Internal* (elemento interno)

RI *Reinforced Internal* (elemento interno reforçado)

A classificação das secções é conseguida através do parâmetro β . Este parâmetro, designado por parâmetro de esbelteza, caracteriza a suscetibilidade à encurvadura local de uma parede da secção transversal não reforçada e apresenta os seguintes valores:

- a) Elementos internos sem gradiente de tensão

$$\beta = b/t \quad (3.1)$$

- b) Elementos internos com gradiente de tensão com $\psi = -1$

$$\beta = 0,4 b/t \quad (3.2)$$

- c) Elementos internos com gradiente de tensão

$$\beta = \eta b/t \quad (3.3)$$

onde

b representa a largura do elemento

t representa a espessura da secção

η representa o coeficiente do gradiente de tensão, dado pelas expressões:

$$\eta = 0,70 + 0,30\psi \quad (1 \geq \psi \geq -1) \quad (3.4)$$

$$\eta = 0,80/(1 - \psi) \quad (\psi < -1) \quad (3.5)$$

onde

ψ representa o rácio entre as tensões na extremidade da parede em relação à maior tensão de compressão.

A relação entre η e ψ pode ser observada através da Figura 3.2.

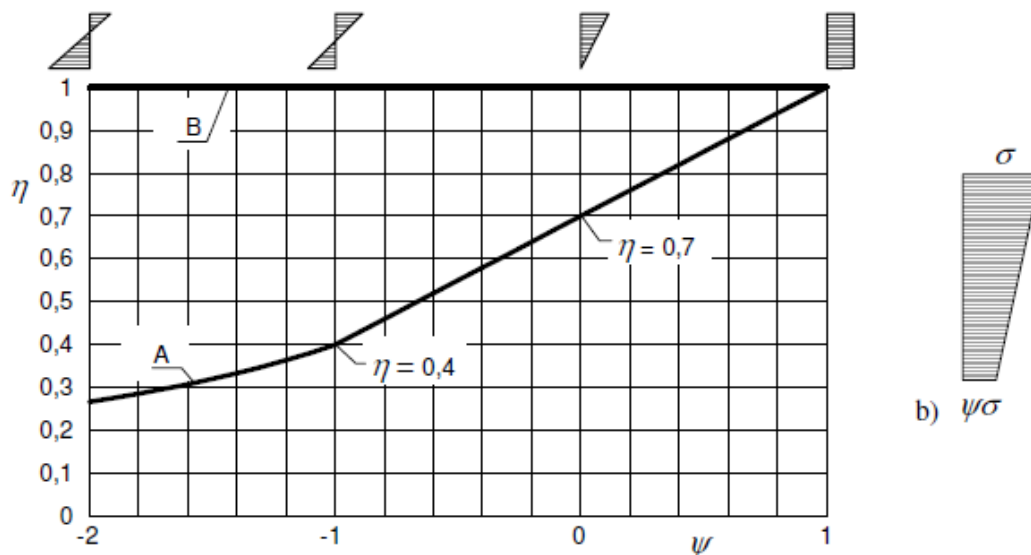


Figura 3.2. Valores de η e ψ [18]

A classificação dos elementos da secção transversal de acordo com o parâmetro de esbelteza β pode ser definida do seguinte modo:

$\beta < \beta_1$ classe 1

$\beta_1 < \beta \leq \beta_2$ classe 2

$\beta_2 < \beta \leq \beta_3$ classe 3

$\beta_3 < \beta$ classe 4

Os valores de β_1 , β_2 e β_3 podem ser consultados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Valores dos parâmetros de esbelteza, β [18]

Classificação do material	Elementos internos			Elementos externos		
	β_1/ε	β_2/ε	β_3/ε	β_1/ε	β_2/ε	β_3/ε
Classe A sem soldaduras	11	16	22	3	4,5	6
Classe A com soldaduras	9	13	18	2,5	4	5
Classe B sem soldaduras	13	16,5	18	3,5	4,5	5
Classe B com soldaduras	10	13,5	15	3	305	4

onde

$$\varepsilon = \sqrt{250/f_0} \quad (3.6)$$

3.1.2 Resistência à flexão

A resistência à flexão deverá ser verificada do seguinte modo:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} \quad (3.7)$$

onde

M_{Ed} é o valor de cálculo do momento atuante

M_{Rd} o valor de cálculo do momento fletor resistente da secção, que deverá ser considerado o menor dos seguintes valores:

secções com furos:

$$M_{u,Rd} = \frac{W_{net} \cdot f_u}{\gamma_{m2}} \quad (3.8)$$

outras secções:

$$M_{c,Rd} = \frac{\alpha \cdot W_{el} \cdot f_o}{\gamma_{m1}} \quad (3.9)$$

onde

α representa o fator de forma, que pode ser obtido na Tabela 3.4.

W_{net} representa o módulo de flexão elástico da secção considerando os furos e a HAZ.

W_{el} representa o modo de flexão elástico da secção.

γ_{m1} representa o coeficiente parcial de segurança para secções transversais, que se considera 1,10.

γ_{m2} representa o coeficiente parcial de segurança para secções transversais sujeitas à tensão última, que se considera 1,25.

Tabela 3.4. Valores do fator de forma, α [18]

Classe da secção	Sem soldaduras	Com soldaduras longitudinais
1	W_{pl}/W_{el}	$W_{pl,haz}/W_{el}$
2	W_{pl}/W_{el}	$W_{pl,haz}/W_{el}$
3	$\alpha_{3,u}$	$\alpha_{3,w}$
4	W_{eff}/W_{el}	$W_{eff,haz}/W_{el}$

Apenas se consideraram os valores do fator de forma, α , para as classes de secção estudadas, classe 1 e 2, e, portanto, o seu valor pode ser obtido através da expressão:

$$\alpha = \frac{W_{pl}}{W_{el,y}} \quad (3.10)$$

3.1.3 Resistência ao esforço transversal

A resistência ao esforço transversal deverá ser verificada do seguinte modo:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} \quad (3.11)$$

onde

V_{Ed} é o valor de cálculo do esforço transverso atuante na secção.

V_{Rd} é o valor de cálculo do esforço transverso resistente da secção.

Para almas não esbeltas, isto é, secções em que $\frac{h_w}{t_w} < 39\varepsilon$, V_{Rd} pode ser obtido através da expressão:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_o}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{m1}} \quad (3.12)$$

onde

$$A_v = \sum_{i=1}^n [(h_w - \sum d)(t_w)i - (1 - \rho_{o,haz})b_{haz}(t_w)i] \quad (3.13)$$

onde

A_v representa a área de corte;

h_w representa a altura da alma;

t_w representa a espessura da alma;

b_{haz} representa o comprimento da HAZ;

d representa o diâmetro dos furos no plano de corte;

n representa o número de almas.

3.1.4 Interação entre momento fletor e esforço transverso

A interação entre o momento fletor e o esforço transverso pode ser verificada, através das expressões 3.14 e 3.15 (correspondendo á curva (2) e (3) da Figura 3.3), desde que $M_{Ed} > M_{f,Rd}$.

$$\frac{M_{Ed} + M_{f,Rd}}{2M_{pl,Rd}} + \frac{V_{Ed}}{V_{w,Rd}} \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (3.14)$$

$$M_{Ed} < M_{c,Rd} \quad (3.15)$$

onde

$M_{f,Rd}$ representa o momento resistente dos banzos;

$M_{pl,Rd}$ representa o momento resistente plástico;

$M_{c,Rd} = W_{eff} \cdot f_o / \gamma_{m1}$, sendo W_{eff} o módulo de flexão efetivo, que pode ser obtido considerando uma redução da espessura, desprezando a presença de furos.

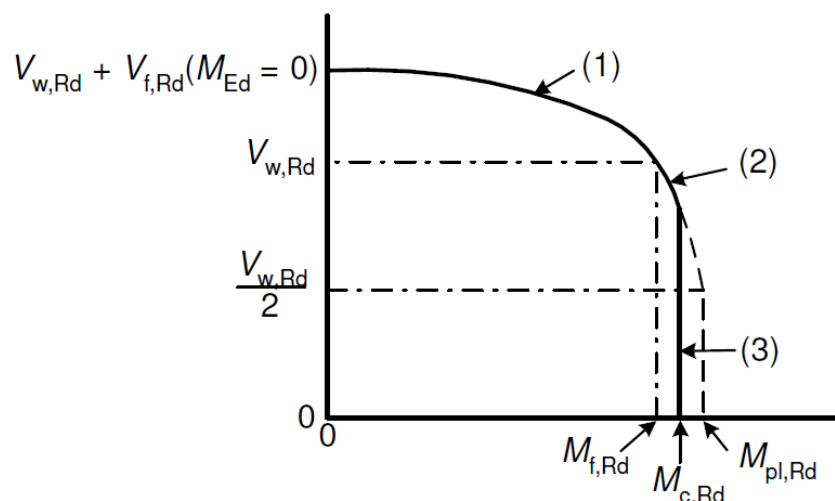


Figura 3.3. Interação entre a resistência ao esforço transversal e a resistência à flexão [18]

3.1.5 Resistência da alma às cargas transversais

A resistência das almas de vigas de perfis extrudidos às cargas transversais aplicadas pelo banzo pode ser determinada através da expressão 3.15, desde que os banzos estejam restringidos, lateralmente, pela sua rigidez, ou por reforços transversais. Os tipos de carregamento, podem ser aplicados do seguinte modo:

- Carregamento aplicado pelo banzo, suportado através de forças de corte na alma (tipo a);
- Carregamento aplicado por um dos banzos e transmitido ao outro através da alma (tipo b);
- Carregamento através de um banzo próximo de um limite não reforçado (tipo c).

Os carregamentos, anteriormente descritos, podem ser consultados, posteriormente, na Figura 3.4

A resistência às cargas transversais, aplicadas através do banzo à alma, pode ser verificada do seguinte modo:

$$F_{Ed} \leq F_{Rd} \quad (3.16)$$

onde:

F_{Ed} representa o valor do esforço transversal

F_{Rd} representa a resistência da alma à compressão que pode ser obtida através da expressão:

$$F_{Rd} = \frac{L_{eff} t_w f_{ow}}{\gamma_{m1}} \quad (3.17)$$

onde:

t_w representa a espessura da alma

f_{ow} representa a tensão característica do material que constitui a alma

L_{eff} representa o comprimento efetivo e pode ser obtido através da expressão:

$$L_{eff} = \chi_f l_y \quad (3.18)$$

onde:

l_y representa o comprimento efetivo, tendo em conta a extensão da ação das cargas, s_s

χ_f representa o fator de redução devido à encurvadura local que pode ser obtido através da expressão:

$$\chi_f = \frac{0,5}{\lambda_f} \leq 1,0 \quad (3.19)$$

onde:

$$\lambda_f = \sqrt{\frac{l_y t_w f_{ow}}{F_{cr}}} \quad (3.20)$$

$$F_{cr} = \frac{0,9 k_F E t_w^3}{h_w} \quad (3.21)$$

e k_F representa a rigidez dos banzos.

Para almas sem reforços longitudinais: k_F pode ser calculado através da figura 6.30 do EC9.

Para almas com reforços longitudinais:

$$k_F = 6 + 2 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 + \left(\frac{5,44 b_1}{a} - 0,21 \right) \sqrt{\gamma_s} \quad (3.22)$$

onde:

b_1 é distância entre o banzo carregado e o travamento lateral

$$\gamma_s = \frac{10,9 I_{sl}}{h_w t_w^3} \leq 13 \left(\frac{a}{h_w} \right)^2 + 210 \left(0,3 - \frac{b_1}{h_w} \right) \quad (3.23)$$

onde:

I_{sl} representa o momento de inércia do elemento de reforço mais perto do banzo carregado incluindo as partes contribuintes da alma de acordo com a figura 6.29 do EC9.

A expressão 3.22 é válida para carregamento do tipo a) e $0,05 \leq \frac{b_1}{h_w} \leq 0,30$.

O cálculo de l_y é efetuado com base em 2 parâmetros dimensionais, m_1 e m_2 :

$$m_1 = \frac{f_{of} b_f}{f_{ow} t_w} \quad (3.24)$$

$$m_2 = 0,02 \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2, \text{ se } \lambda_f > 0,5 \text{ (caso contrário, } m_2 = 0 \text{)} \quad (3.25)$$

onde:

f_{of} representa a tensão característica do material constituinte do banzo

b_f representa a largura do banzo

A Figura 3.4 mostra diferentes tipos de carregamento e os seus respetivos coeficientes de encurvadura.

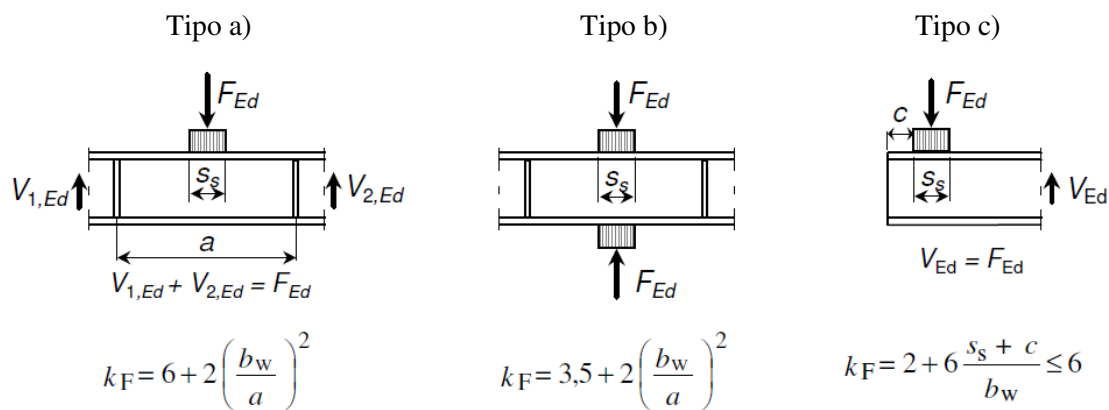


Figura 3.4. Tipo de carregamentos e coeficientes de encurvadura [18]

Para os casos 1 e 2:

$$l_y = s_s + 2t_f(1 + \sqrt{m_1 + m_2}) \leq \text{distância entre reforços transversais sucessivos} \quad (3.26)$$

Para o caso 3, l_y pode ser obtido como o menor dos seguintes valores:

$$l_y = s_s + 2t_f(1 + \sqrt{m_1 + m_2}) \quad (3.27)$$

$$l_y = l_e + t_f \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{l_e}{t_f} \right)^2 + m_2} \quad (3.28)$$

$$l_y = l_e + t_f \sqrt{m_1 + m_2} \quad (3.29)$$

onde:

$$l_e = \frac{k_F E t_w^2}{2 f_{ow} h_w} \leq s_s + c \quad (3.30)$$

onde:

s_s e c são definidos na figura 6.30 do EC9.

3.1.6 Encurvadura lateral

A verificação da encurvadura poderá ser desprezada se:

- a) a flexão ocorrer segundo o menor eixo e o carregamento for aplicado no centro de corte
- b) os deslocamentos laterais estiverem impedidos ao longo de todo o elemento
- c) a esbelteza lateral, λ_{LT} , entre dois pontos restringidos lateralmente for menor que 0,4.

Para elementos sujeitos a flexão segundo o seu maior eixo e deslocamentos laterais não impedidos, a encurvadura lateral tem de ser verificada do seguinte modo:

$$M_{Ed} \leq M_{b,Rd} \quad (3.31)$$

onde $M_{b,Rd}$ é o momento resistente à encurvadura.

Para elementos com deslocamentos laterais não impedidos, o momento resistente á encurvadura, $M_{b,Rd}$, pode ser calculado através da expressão:

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot \alpha \cdot W_{el,y} \cdot f_o}{\gamma_{m1}} \quad (3.32)$$

onde:

$W_{el,y}$ representa o módulo de flexão elástico sem contabilizar os furos, a HAZ e a encurvadura local

α representa o fator de forma dado na Tabela 3.4, sujeito à limitação: $\alpha \leq \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}}$ (3.33)

χ_{LT} representa o fator de redução da resistência devido à encurvadura lateral que pode ser calculado através da expressão:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (3.34)$$

onde:

$$\phi_{LT} = \frac{1}{2} (1 + \alpha_{LT} (\lambda_{LT} - \lambda_{0,LT}) + \lambda_{LT}^2) \quad (3.35)$$

α_{LT} representa o fator de imperfeição

$\bar{\lambda}_{LT}$ representa a esbelteza adimensional

$\bar{\lambda}_{0,LT}$ representa o limite do patamar horizontal

O valor de α_{LT} e $\lambda_{0,LT}$ poderá ser obtido do seguinte modo:

Secções transversais de classe 1 ou 2: $\alpha_{LT} = 0,10$ e $\lambda_{0,LT} = 0,60$ (3.36)

Secções transversais de classe 3 ou 4: $\alpha_{LT} = 0,20$ e $\lambda_{0,LT} = 0,40$ (3.37)

A esbelteza adimensional, $\bar{\lambda}_{LT}$, é dada por:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{\alpha \cdot W_{el,y} \cdot f_o}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{\frac{W_{pl}}{W_{el,y}} \cdot W_{el,y} \cdot f_o}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{W_{pl} \cdot f_o}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{M_{Rd}}{M_{cr}}} \quad (3.38)$$

onde:

M_{cr} representa o momento crítico devido à encurvadura lateral, dado no anexo I do EC9

M_{Rd} representa o valor de cálculo do momento resistente da secção transversal traduzido pela expressão:

$$M_{Rd} = W_{pl} \cdot f_{o,2} \quad (3.39)$$

onde:

W_{pl} representa o módulo de flexão plástico, que para secções em I com banzos iguais é dado pela expressão:

$$W_{pl} = b_f \cdot t_f \cdot (h - t_f) + \frac{h_w^2 \cdot t_f}{4} \quad (3.40)$$

Para vigas de secção uniforme e duplamente simétricas, o momento crítico, M_{cr} , pode ser calculado, simplifcadamente, pela expressão:

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 E I_z}{L^2} \sqrt{\frac{L^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + \frac{I_w}{I_z}} = \frac{\pi \sqrt{E I_z G I_t}}{L} \sqrt{1 + \frac{\pi^2 E I_w}{L^2 G I_t}} \quad (3.41)$$

onde:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.42)$$

I_z representa a inércia segundo Z

I_t representa a inércia de torção

I_w representa a constante de empenamento

L representa a distância entre travamentos laterais

ν representa o coeficiente de poisson

Nota: as inércias I_z , I_t e I_w serão definidas no capítulo 4.

Os efeitos de encurvadura podem ser desprezados caso: $\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{0,LT}$ ou $M_{Ed} \leq \bar{\lambda}_{0,LT}^2 \cdot M_{cr}$.

Alternativamente, os valores de χ_{LT} podem ser obtidos a partir das curvas de encurvadura presentes no EC9.

Capítulo 4

4. Determinação da resistência à encurvadura lateral de vigas de alumínio, com base em cargas críticas elasto-plásticas

4.1 Introdução

Neste capítulo aborda-se a determinação da resistência à encurvadura lateral de vigas de alumínio com base no cálculo das cargas críticas de bifurcação elasto-plásticas. Conforme foi já referido no Capítulo 1, no seu essencial, esta abordagem consiste em escrever as curvas de dimensionamento do EC9 em função de uma esbelteza normalizada calculada com o valor da carga crítica elasto-plástica, ao invés da carga crítica elástica.

No caso de vigas, a determinação das cargas críticas elasto-plásticas é significativamente mais complexa do que no caso das colunas (uniformemente comprimidas). Para este efeito foi criada uma rotina em MATLAB, a qual é explicada na secção 4.2. Finalmente, na secção 4.3 apresenta-se um estudo paramétrico, para aferir a influência das propriedades do material e da geometria da secção transversal.

4.2 Programa de cálculo automático

Como foi anteriormente referido, o caso de estudo é o de uma viga simplesmente apoiada, com secção em I duplamente simétrica (ver Figura 4.1), sujeita a flexão pura.

Para o caso elástico, o momento crítico pode ser calculado através da expressão:

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 EI_z}{L^2} \sqrt{\frac{L^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + \frac{I_w}{I_z}} = \frac{\pi \sqrt{EI_z GI_t}}{L} \sqrt{1 + \frac{\pi^2 EI_w}{L^2 GI_t}} \quad (4.1)$$

onde

L representa a distância entre travamentos laterais (vão da viga)

ν representa o coeficiente de Poisson

E representa o módulo de elasticidade na origem

G representa o módulo de distorção

I_w representa a inércia de empenamento

I_z representa a inércia segundo o eixo z

Para o caso elasto-plástico, a fórmula anterior pode ainda ser utilizada, mas os termos EI_w , EI_z e GI_t têm de ser calculados por integração na secção transversal, tendo em conta a degradação da rigidez do material na presença de tensões de pré-encurvadura. No caso em análise, o estado de tensão de pré-encurvadura é uniaxial, com uma distribuição não-linear na secção transversal, mas uniforme no comprimento da barra (flexão pura). A determinação de EI_w , EI_z e GI_t é feita com base na teoria

incremental da plasticidade J_2 (critério de cedência de von Mises e lei de escoamento associada), segundo a qual, para um estado de tensão inicial uniaxial, E deve ser substituído por E_t (declive do diagrama σ - ϵ) e G assume o valor elástico [4].

Por questões de otimização de cálculo, foram efetuadas duas simplificações de simetria da secção transversal, resultando na consideração da secção representada na Figura 4.2.

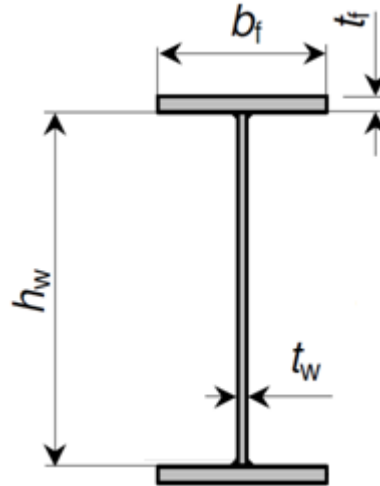


Figura 4.1. Secção transversal em I

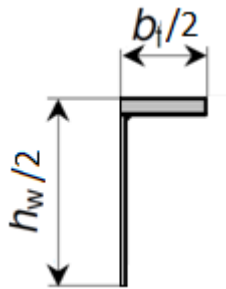


Figura 4.2. Dupla simplificação de simetria considerada

A rotina começa com a inserção dos dados do problema: geometria da secção transversal, características da liga (valor da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% da liga em estudo, $f_{0,2}$, e o fator de endurecimento n) e discretização da secção para o cálculo elastoplástico. A discretização é conseguida dividindo a secção em pequenos elementos, conforme ilustrado na Figura 4.3, de largura e altura t_w/n_y , b_f/n_y e h_w/n_z , t_f/n_z respetivamente, onde n_y representa o número de divisões segundo o eixo y e n_z o número de divisões segundo o eixo z.

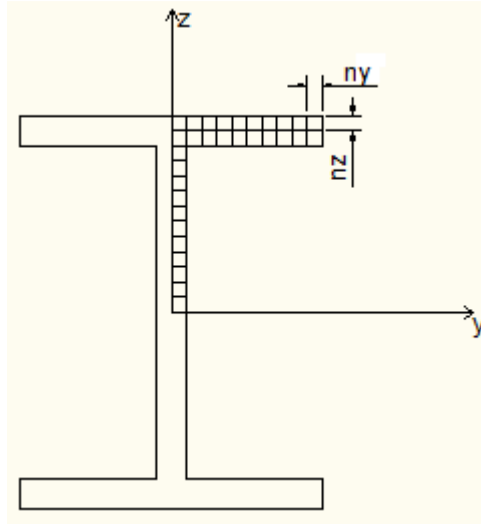


Figura 4.3. Discretização da secção transversal

Garantiu-se uma elevada precisão dos cálculos através da consideração de uma discretização refinada, considerando $n_y = n_z = 100$, o que resulta na divisão da largura e altura do meio banzo e da meia altura da alma em 100 elementos, isto é, 100×100 elementos (10.000 elementos), tanto para o meio banzo como para a meia alma. Para cada um dos elementos constituintes da alma e do banzo, foram calculadas e guardadas, em matrizes, as coordenadas dos seus centróides e as áreas de cada elemento.

4.2.1 Cálculo Elastoplástico

A extensão em cada elemento de área, ε_i , é dada por:

$$\varepsilon_i = z_i \cdot \frac{1}{R} \quad (4.2)$$

onde:

$\frac{1}{R}$ representa a curvatura da secção.

z_i representa a distância entre o centroide de cada elemento i e a linha neutra da secção.

A tensão em cada elemento, σ_i , pode ser obtida através da resolução da expressão que traduz a lei de Ramberg-Osgood (expressão 2.1), o que se traduz no cálculo das raízes da seguinte expressão:

$$\varepsilon_i - \left[\frac{\sigma_i}{E_0} + \varepsilon_{0,2} \cdot \left(\frac{\sigma_i}{f_{0,2}} \right)^n \right] = 0 \quad (4.3)$$

Por fim, E_t resulta da derivação da lei de Ramberg-Osgood (expressão 2.1) em ordem à deformação, ε , sendo dado pela expressão:

$$E_t = \frac{500 \cdot E_0}{E_0 \cdot \left(\frac{\sigma^{n-1}}{f_{0,2}^n} \right) \cdot n + 500} \quad (4.4)$$

Note-se que, de acordo com (4.1), a cada z_i corresponde um diferente valor de E_t .

As rigidezes podem ser obtidas através das seguintes expressões:

$$EI_y = 4 \times \int_{\Omega} z_i^2 \cdot E_t d\Omega = 4 \times \sum_{i=0}^{nz} z_i^2 \cdot A_i \cdot E_{t_i} \quad (4.5)$$

$$EI_z = 4 \times \int_{\Omega} y_i^2 \cdot E_t d\Omega = 4 \times \sum_{i=0}^{nz} y_i^2 \cdot A_i \cdot E_{t_i} \quad (4.6)$$

$$EI_w = 4 \times \int_{\Omega} \bar{w}_i^2 \cdot E_t d\Omega = 4 \times \sum_{i=0}^{nz} \bar{w}_i^2 \cdot A_i \cdot E_{t_i} \quad (4.7)$$

onde:

z_i representa a distância entre o centroide de cada elemento e a linha neutra (eixo y)

y_i representa a distância entre o centroide de cada elemento e o eixo de simetria vertical (eixo z)

A função de empenamento \bar{w}_i é dada por (ver Figura 4.4):

$$\bar{w} = y_i \cdot \frac{(h-t_f)}{2} \quad (4.8)$$

onde

h representa a altura da secção

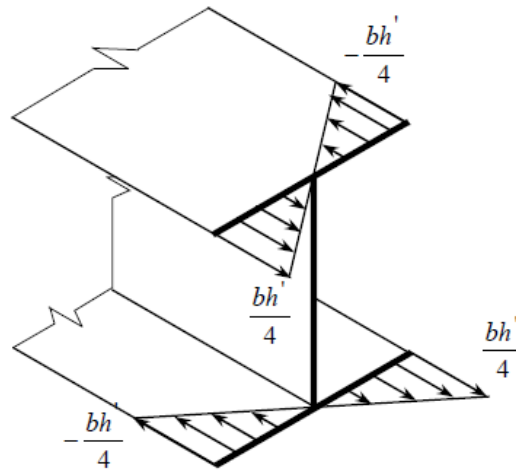


Figura 4.4. Função de empenamento para uma viga em I [20]

Ainda em relação á inércia de empenamento, EI_w , é preciso realçar que é constituída por duas parcelas:

- Empenamento primário: empenamento que ocorre ao longo da largura do banzo.
- Empenamento secundário: empenamento que ocorre ao longo da espessura do banzo.

Por simplificação, desprezou-se a contribuição do empenamento secundário, dado que é muito pouco significativa em secções em I.

A rigidez de torção pode ser diretamente obtida através da expressão:

$$GI_t = GJ = G \times \frac{2b_f \cdot t_f^3 + (h-t_f) \cdot t_w^3}{3} = \frac{(2b_f \cdot t_f^3 + (h-t_f) \cdot t_w^3) \cdot E}{6 \cdot (1+\nu)} \quad (4.9)$$

O momento atuante resulta da integração das tensões na altura da secção e pode ser obtido através de:

$$M_{atuante} = \int_{\Omega} z_i \cdot \sigma_i d\Omega = \sum_{i=0}^{2nz} z_i \cdot \sigma_i \cdot A_i \quad (4.10)$$

Para determinar o momento crítico, estabelece-se um valor da curvatura e faz-se variar o comprimento da viga L até que M_{cr} iguale o valor do momento atuante.

Calculado o momento crítico elastoplástico, $M_{cr,ep}$, a esbelteza elastoplástica, $\bar{\lambda}_{ep}$, pode ser calculada pela expressão 3.38, substituindo M_{cr} por $M_{cr,ep}$.

4.2.2 Cálculo Elástico

A metodologia de cálculo para obter o momento crítico elástico é substancialmente mais simples que a anterior. O módulo de elasticidade, E , é constante na secção transversal, pelo que se tem:

$$I_y = 2 \cdot \frac{b_f t_f^3}{12} + b_f \cdot t_f \cdot \left(\frac{h_w}{2} + \frac{t_f}{2} \right)^2 + \frac{t_w \cdot h_w^3}{12} \quad (4.10)$$

$$I_z = 2 \cdot \frac{t_f b_f^3}{12} + \frac{h_w \cdot t_w^3}{12} \quad (4.11)$$

$$I_w = \frac{t_f b_f^3}{24} \cdot (h - t_f)^2 \quad (4.12)$$

O momento crítico elástico, $M_{cr,el}$, pode ser obtido através da expressão:

$$M_{cr,el} = \frac{\pi \sqrt{E I_z G I_t}}{L} \sqrt{1 + \frac{\pi^2 E I_w}{L^2 G I_t}} \quad (4.13)$$

A esbelteza elástica, $\bar{\lambda}_{el}$, pode ser obtida através da expressão 3.35, substituindo M_{cr} por $M_{cr,el}$.

O fator de redução elástico é dado por:

$$\chi_{LT} = \chi = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (4.14)$$

Por fim, construíram-se as curvas de encurvadura elástica, elastoplástica e a curva de Euler. A curva elástica é a curva que representa a relação entre o fator de redução elástico, χ , obtido através da expressão 4.14, e a esbelteza elástica, $\bar{\lambda}_{el}$ (como se pode observar na Figura 4.5).

Recorrendo aos valores de χ e $\bar{\lambda}_{ep}$, traçou-se a curva elastoplástica, que não é mais que a translação da curva elástica (EC9), já que representa o mesmo coeficiente de redução da curva elástica, mas em função da esbelteza elastoplástica.

Foi criado um fluxograma que visa resumir o processo de cálculo numérico criado no MATLAB e que pode ser consultado na Figura 4.7.

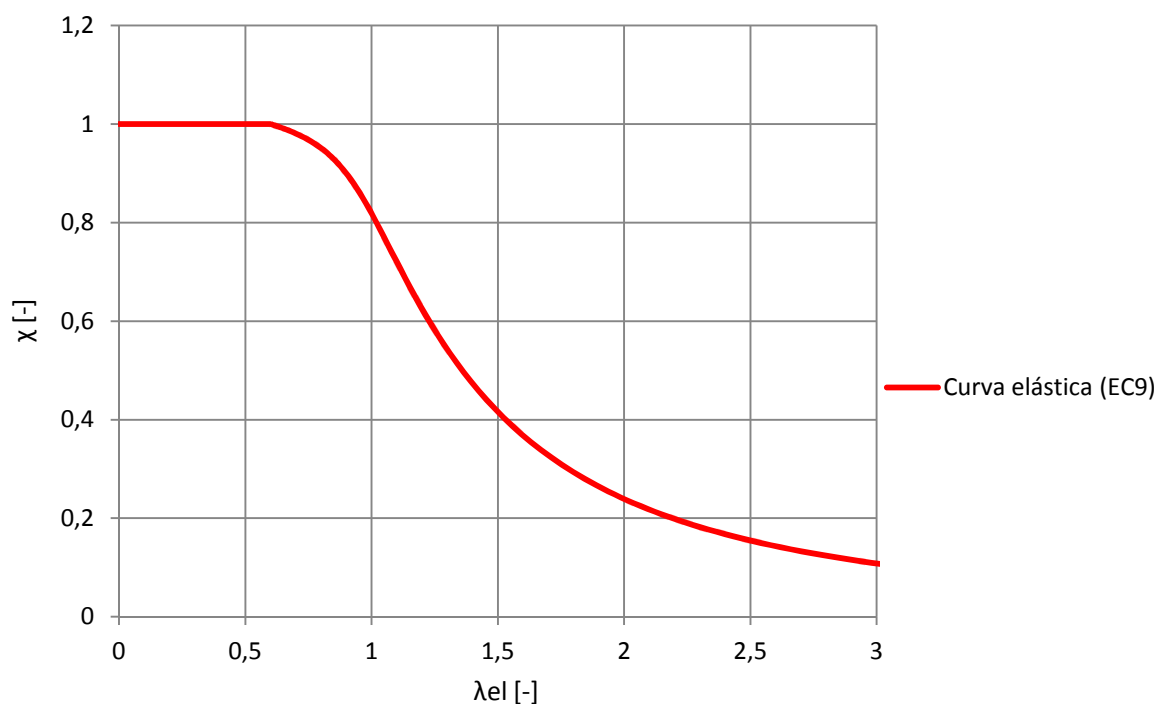


Figura 4.5. Curva elástica (EC9)

Para uma coluna ideal (sem imperfeições), a curva de dimensionamento será dada por:

$$\chi = \frac{1}{\lambda^2} \quad (4.15)$$

onde a esbelteza, poderá ser tomada com o valor elástico ou elastoplástico, consoante o caso.

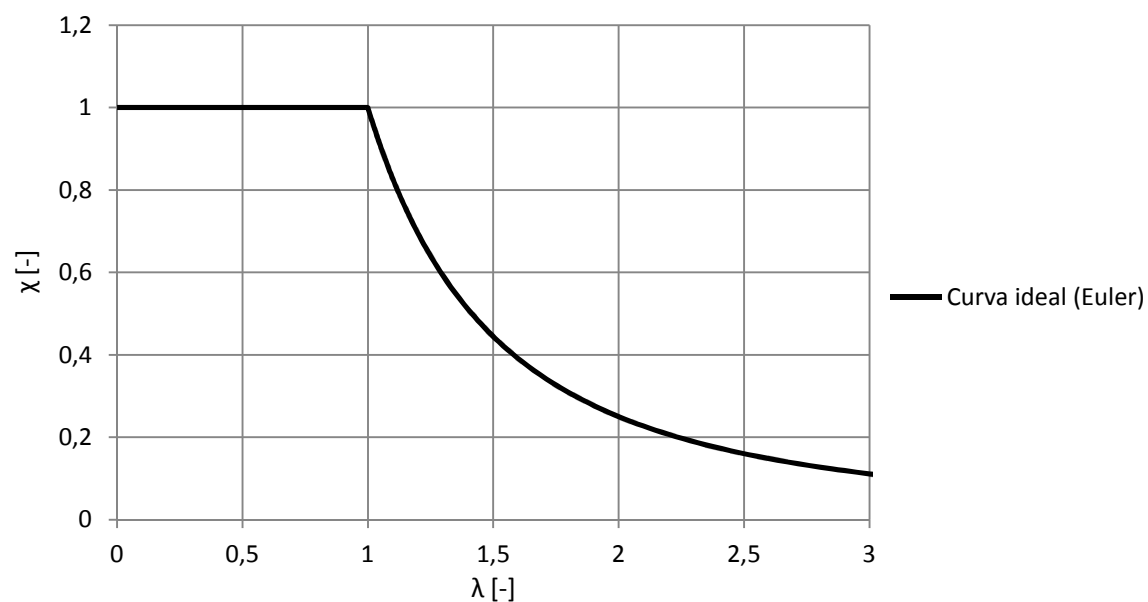


Figura 4.6. Curva da coluna ideal (Euler)

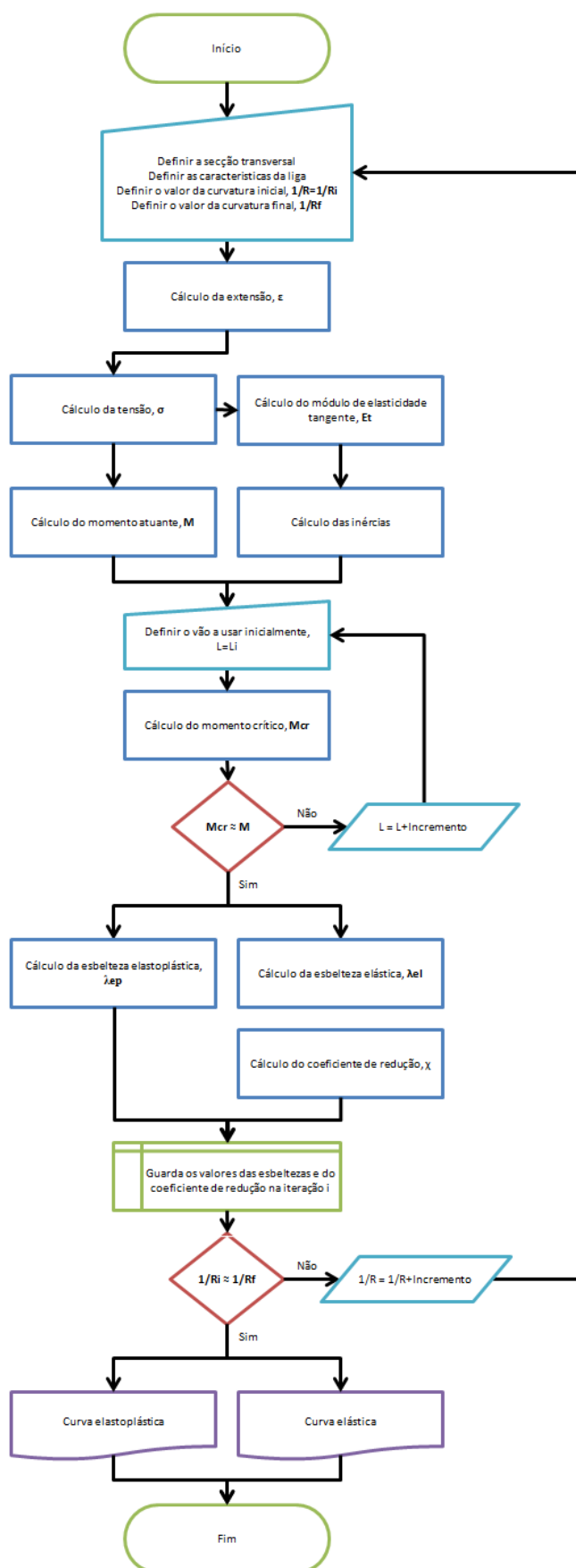


Figura 4.7. Fluxograma da rotina em MATLAB

4.3 Estudo paramétrico

As ligas pertencentes às séries 5XXX e 6XXX são as mais usadas no dimensionamento de estruturas em alumínio, por apresentarem uma adequada combinação entre resistência (média a alta), possibilidade de serem soldadas e resistência à corrosão [17].

Uma das ligas usadas extensivamente na Europa é a liga 5083. As ligas da série 6XXX também são frequentemente usadas por apresentarem uma melhor maleabilidade que permite o seu fabrico via extrusão. As ligas da série 6XXX mais usadas são a 6005A, 6060, 6083e 6082 [17].

A escolha das ligas que serviram de base ao presente estudo baseou-se em selecionar não só as ligas mais comuns e mais usadas em aplicações estruturais, mas também ligas que tenham servido de modelo em estudos anteriores e ligas com as características mais representativas, de modo a poder extrair conclusões abrangentes. Foram então escolhidas catorze ligas, sete pertencentes à classe A e sete pertencentes à classe B. As propriedades das ligas escolhidas são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Características das ligas selecionadas

Liga	Têmpera	$f_{0,2}$ [MPa]	f_u [MPa]	$f_{0,haz}$ [MPa]	$f_{u,haz}$ [MPa]	BC	n
5005A	H111	35	100	35	100	B	5
5754	H111	80	190	80	190	B	6
5083	H111	110	270	110	270	B	5
6061	T4	110	180	95	150	B	8
6060	T5	100	140	50	80	B	14
5083	H12	200	280	135	270	B	14
5052	H12	160	210	80	70	B	17
6005A	T6	200	250	115	165	A	20
6060	T6	140	170	60	100	A	24
6063	T66	200	245	75	130	A	22
6063	T6	160	195	65	110	A	24
6061	T651	240	290	115	175	A	23
6082	T6	260	310	125	185	A	25
6061	T6	240	260	115	175	A	55

Através da lei de Ramberg-Osgood foi possível traçar, para as ligas escolhidas, as diferentes curvas tensão-deformação que são apresentadas na Figura 4.8.

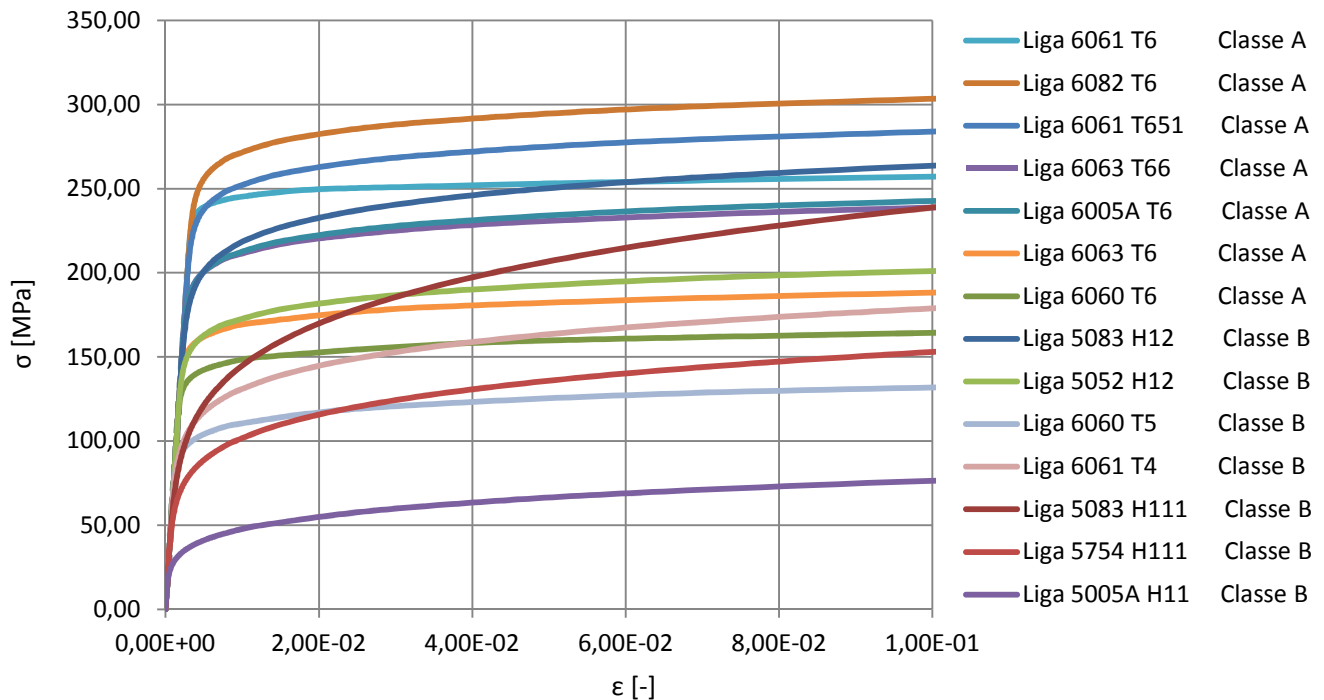


Figura 4.8. Curvas tensão-deformação das ligas selecionadas

Da observação da Figura 4.8 pode perceber-se que a escolha da liga, e as diferentes características de cada uma, dão origem a curvas tensão-deformação significativamente distintas. As ligas da série 6XXX apresentam valores de f_o superiores e, conseqüentemente, patamares elásticos maiores. No entanto, existem ligas da série 5XXX que se assemelham a algumas ligas da série 6XXX por apresentarem, também, valores de f_o elevados.

A variação do módulo tangente pode ser observada, para cada liga, na Figura 4.9.

De modo a obter uma perspectiva tanto da influência da secção como do tipo de liga nas curvas de encurvadura, foram considerados dois conjuntos de ligas, em função do tipo de análise:

Análise 1 – Influência dos diferentes tipos de ligas

Análise 2 – Influência da geometria da secção transversal

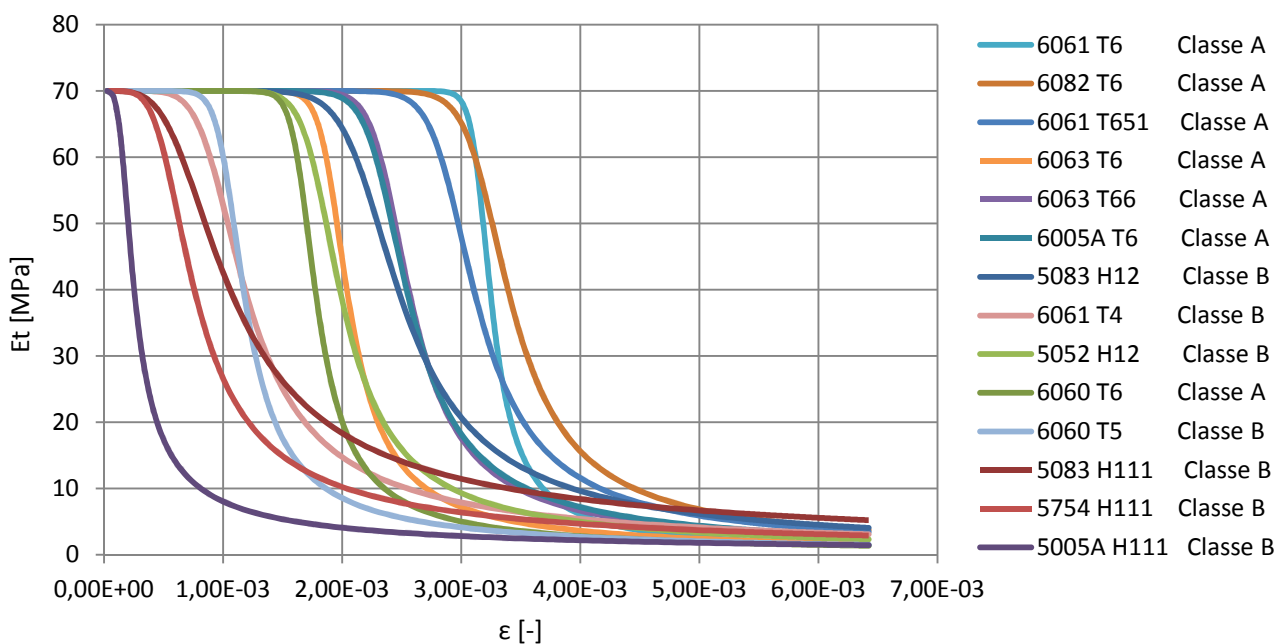


Figura 4.9. Variação do módulo tangente, E_t

4.3.1 Análise 1

Na primeira análise, foram testadas duas secções transversais distintas para cada uma das catorze ligas, apresentadas anteriormente. A geometria das secções é indicada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Secções transversais usadas na análise 1

Tipo de secção	b_f [mm]	t_f [mm]	h_w [mm]	t_w [mm]
H	100	10	110	10
I	50	10	110	10

Apenas foram consideradas secções transversais de classe 1 ou 2.

Para a secção H, apresentada anteriormente na Tabela 4.2, obtiveram-se as seguintes curvas de encurvadura das ligas de classe A:

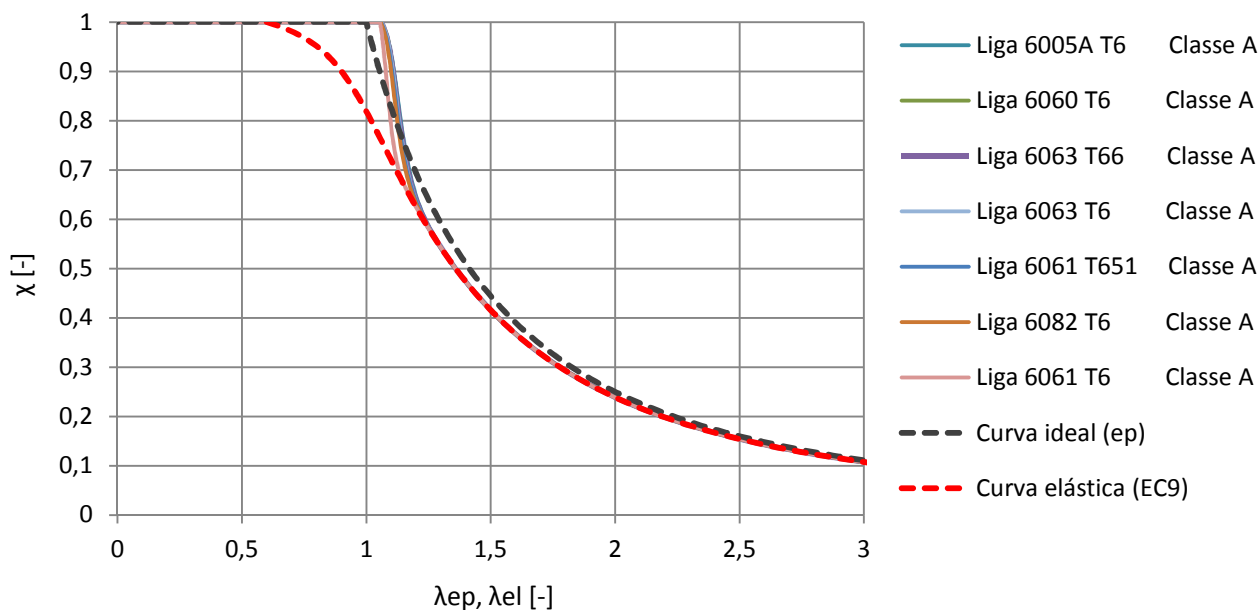


Figura 4.10. Curvas de dimensionamento das ligas de classe A - Seção em H

Da análise da Figura 4.10 pode verificar-se que as curvas de encurvadura “elastoplásticas” praticamente se sobrepõem.

A gama de ligas escolhidas é suficientemente transversal para se poder afirmar que, para esta classe, as ligas apresentam curvas de encurvadura “elastoplásticas” muito próximas, o que torna possível a determinação da sua resistência à encurvadura lateral recorrendo apenas a uma curva de dimensionamento.

A Figura 4.11 mostra as curvas de encurvadura obtidas para a classe B, também para a secção em H.

Ao contrário do que se verificou na Figura 4.10, no caso das ligas de classe de encurvadura B, observa-se uma grande dispersão de curvas “elastoplásticas”, o que não permite a consideração uma única curva de dimensionamento, que mostre com detalhe, o comportamento à encurvadura para toda esta classe.

Por fim, na Figura 4.12, mostram-se todas as curvas de encurvadura para ambas as classes, de modo a poder obter-se uma visão generalizada dos resultados obtidos para a secção transversal em H.

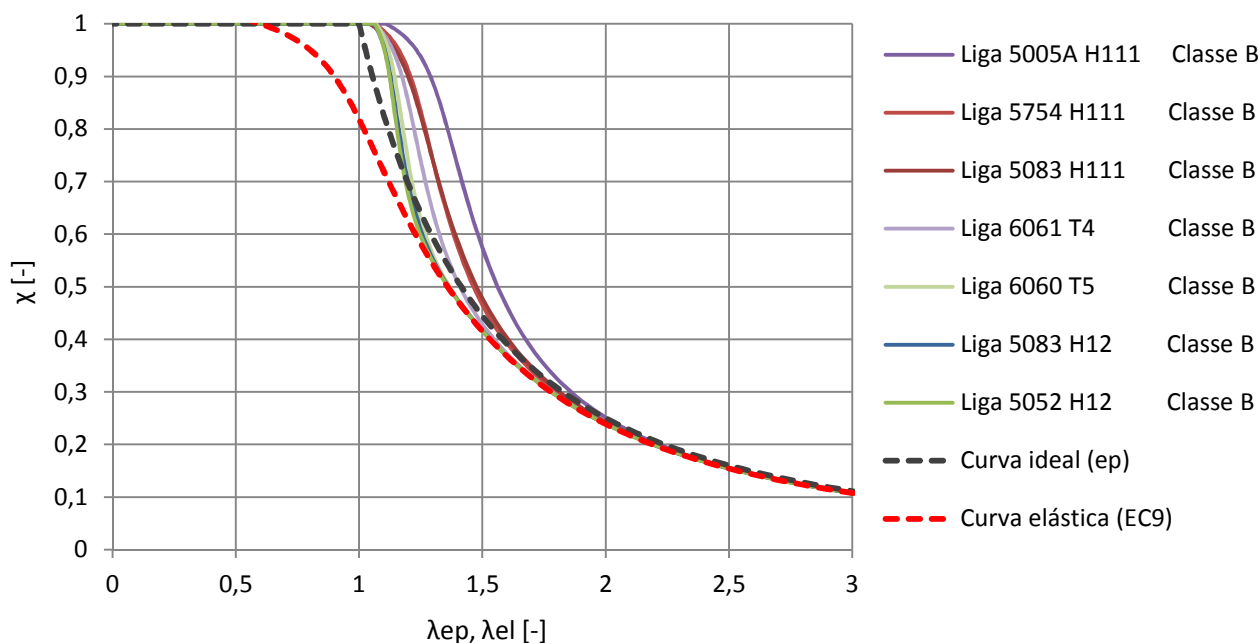


Figura 4.11. Curvas de dimensionamento das ligas de classe B - Secção em H

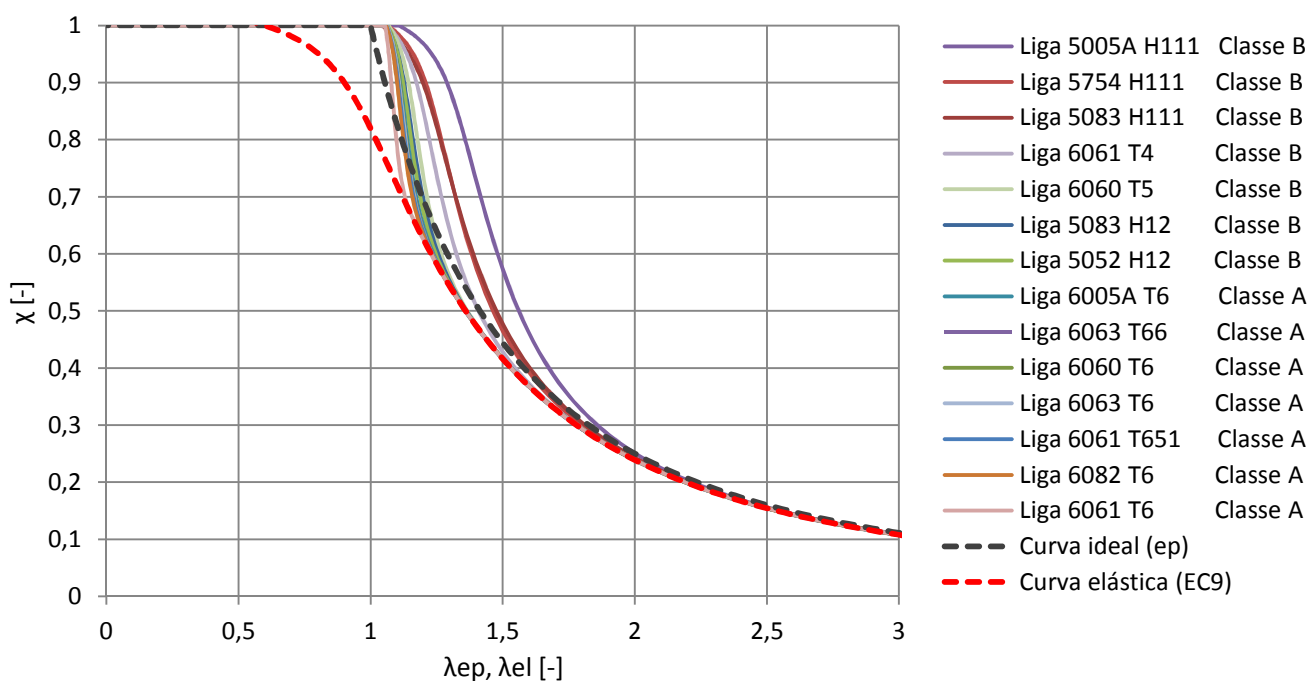


Figura 4.12. Curvas de dimensionamento para a secção em H

A análise 1 levada a cabo para a secção em H foi também efetuada para a secção em I. A Figura 4.13 mostra os resultados obtidos para a classe A.

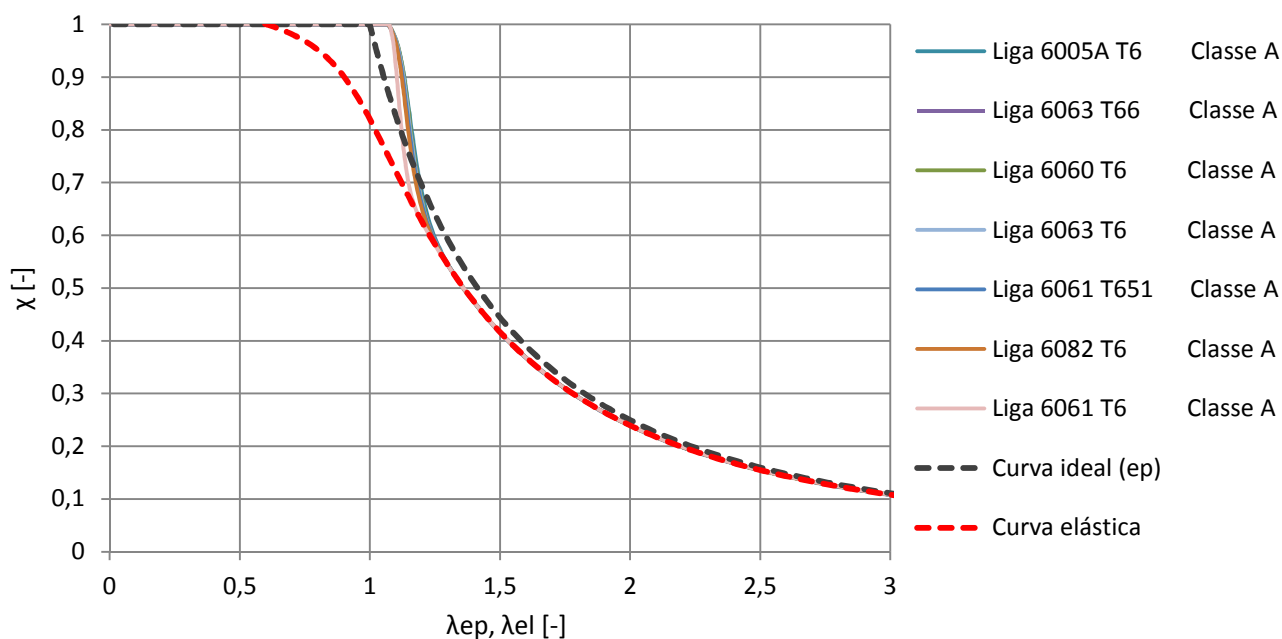


Figura 4.13. Curvas de dimensionamento das ligas de classe A - Secção em I

Mais uma vez verifica-se que praticamente não existe dispersão das curvas “elastoplásticas”, podendo então representar-se toda esta classe através de apenas uma única curva.

Na Figura 4.14 podem ser observadas as curvas das ligas de classe B.

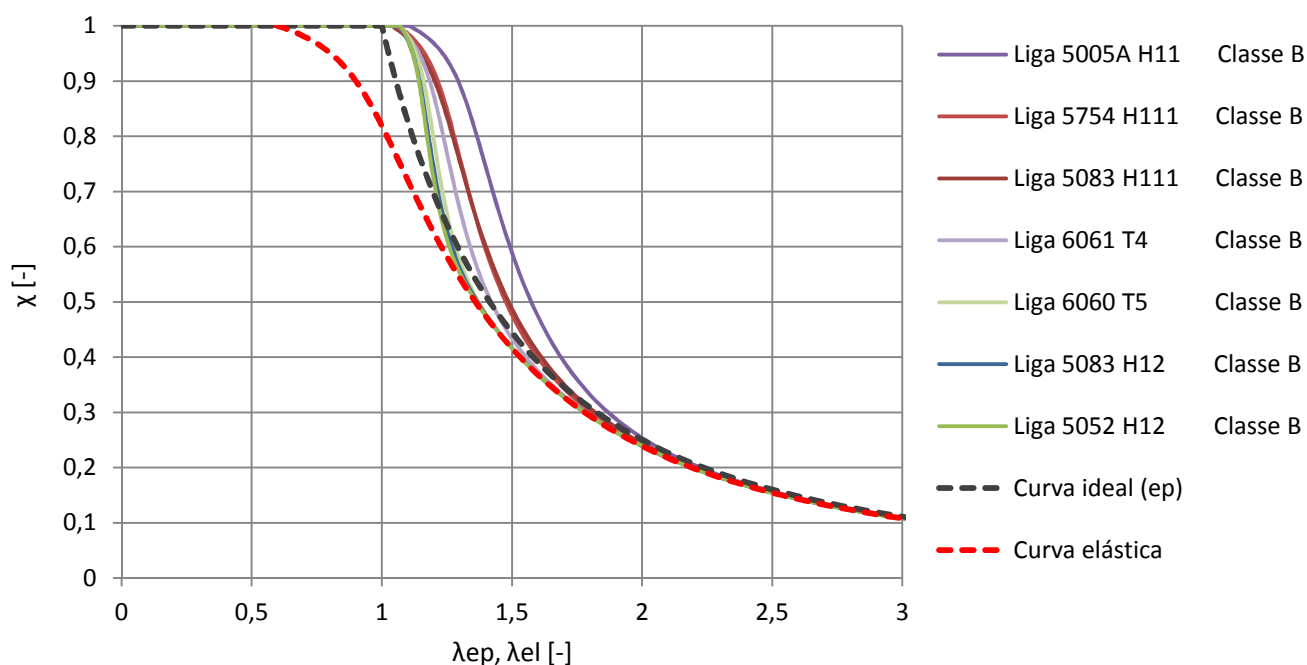


Figura 4.14. Curvas de dimensionamento das ligas de classe B - Secção em I

Analogamente ao que se verificou anteriormente, as curvas “elastoplásticas” das ligas de classe B são claramente distintas e portanto não é possível adotar uma única curva.

Por fim, na Figura 4.15, mostram-se todas as curvas de encurvadura, para ambas as classes, de modo a poder obter-se uma visão generalizada dos resultados obtidos para a secção transversal em I.

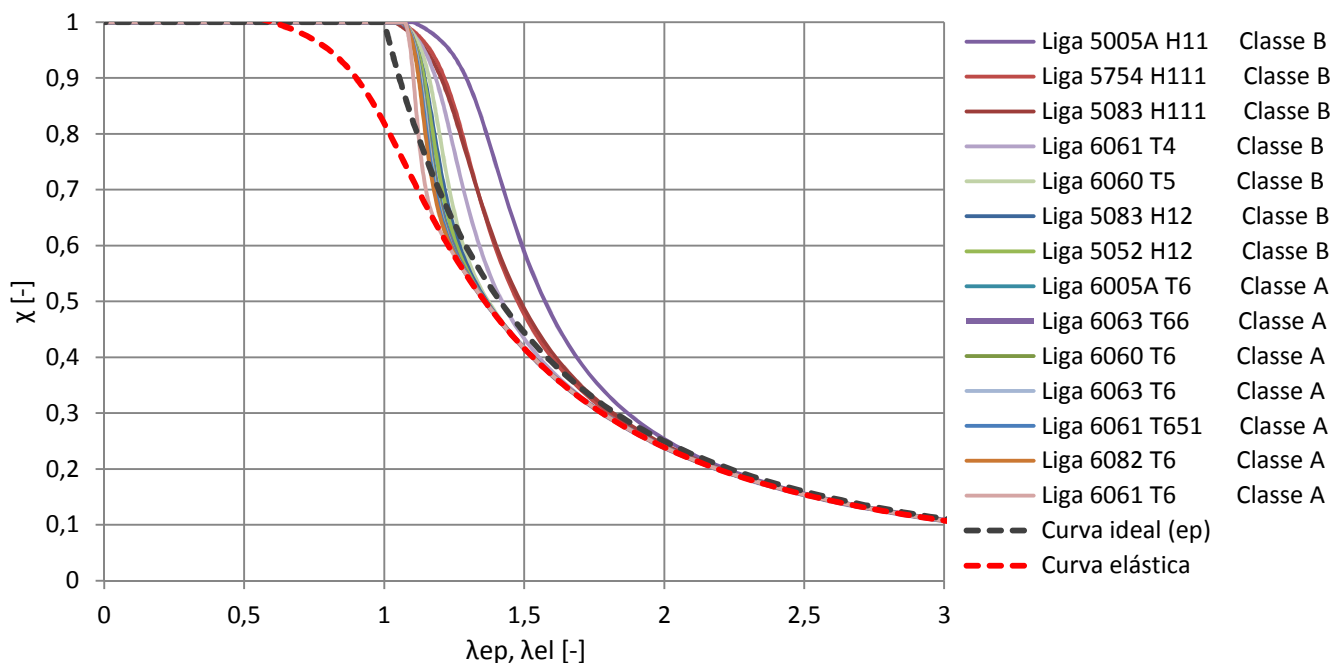


Figura 4.15. Curvas de dimensionamento para a secção em I

Já na análise 1 foram consideradas duas secções transversais distintas para que fosse possível a observação da influência da secção transversal, o que torna possível obter uma comparação das curvas de encurvadura para as secções em I e H anteriormente consideradas. Tal comparação pode ser observada recorrendo à Figura 4.16.

A Figura 4.16 mostra que a alteração da secção transversal provoca, tal como a alteração das características das diferentes ligas, uma translação das curvas de encurvadura, que no caso, corresponde a uma translação horizontal, da esquerda para a direita, da secção em H para a secção em I. No entanto, a translação das curvas não é significativa, já que as curvas tanto para a secção em H como para a secção em I estão bastante próximas e, a Figura 4.16 mostra que ao compilar todos os resultados obtidos na análise 1 se obteve um conjunto de curvas, que formam uma mancha, em que as curvas que lhe servem de limite, considerando as curvas limites obtidas para ambas as secções, se encontram praticamente sobrepostas.

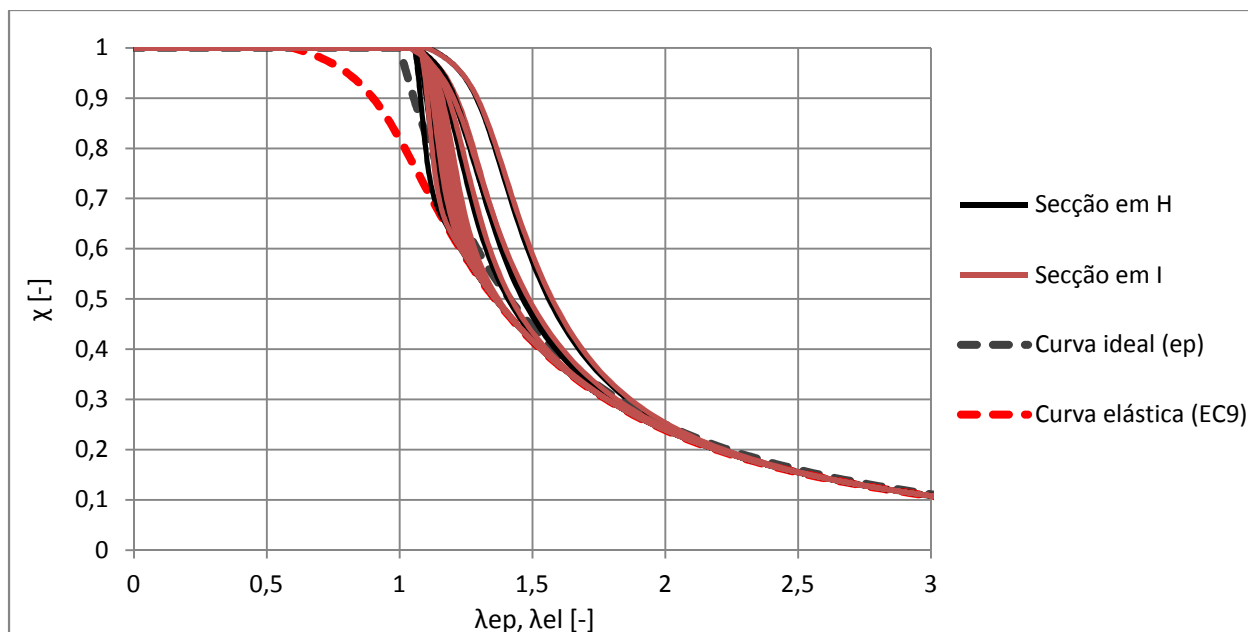


Figura 4.16. Curvas de dimensionamento para as secções em H e I

4.3.2 Análise 2

A Análise 2 pretende fornecer um olhar mais aprofundado sobre a influência do emprego de diferentes secções transversais. Para isso, escolheram-se quatro ligas distintas, duas referentes à classe de encurvadura A e duas à classe B. As ligas foram seleccionadas com o critério de representarem o comportamento típico das ligas da classe em que se inserem. Foram então escolhidas as ligas 6063 T66 e 6060 T6 para a classe A e 5083 H12 e 5083 H111 para a classe B.

Tabela 4.3. Características das ligas seleccionadas na análise (2)

Liga	Têmpera	f_0 [MPa]	f_u [MPa]	$f_{0,haz}$ [MPa]	$f_{u,haz}$ [MPa]	BC	n_p
5083	H12	200	280	135	270	B	14
5083	H111	110	270	110	270	B	5
6060	T6	140	170	60	100	A	24
6063	T66	200	245	75	130	A	22

Para cada uma das ligas seleccionadas foram escolhidas quatro secções transversais (recorde-se que, na análise anterior, foram consideradas apenas duas secções), de classe 1 ou 2, variando a largura do banzo. As geometrias das secções transversais escolhidas podem ser consultadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Características dos modelos escolhidos para a classe A e B

Secção	b_f [mm]	t_f [mm]	h_w [mm]	t_w [mm]
--------	------------	------------	------------	------------

1	100	10	110	10
2	75	10	110	10
3	50	10	110	10
4	25	10	110	10

As figuras Figura 4.17 e Figura 4.18 mostram as diferentes curvas obtidas para as ligas da classe A.

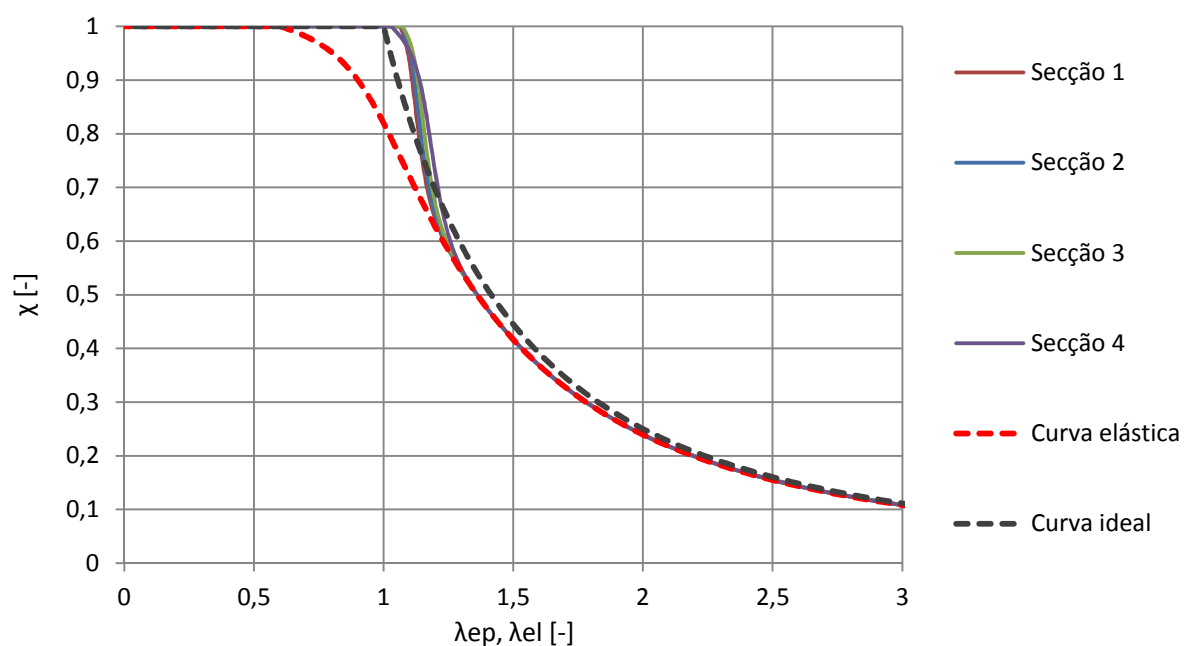


Figura 4.17. Curvas de dimensionamento para a liga 6060 T6 da classe A

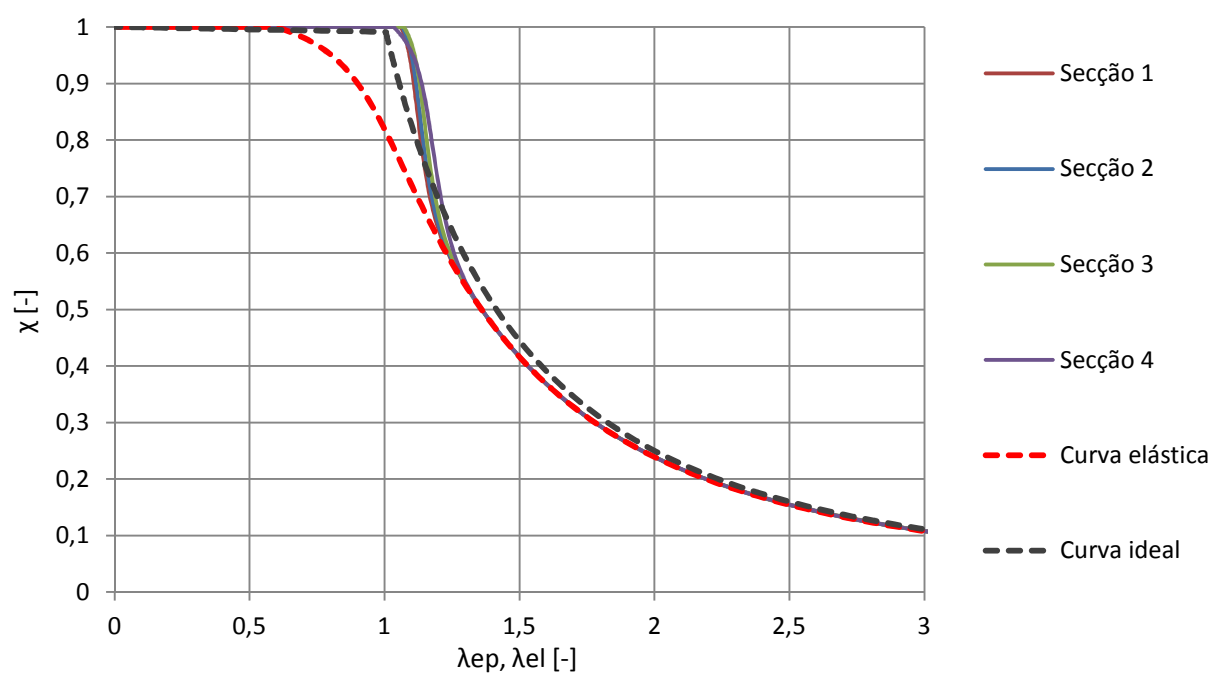


Figura 4.18. Curvas de dimensionamento para a liga 6063 T66 da classe A

A liga 6063 T66 apresenta curvas de semelhantes às da liga 6060 T6 para todos as secções analisadas.

As curvas associadas às secções estudadas, apresentam apenas pequenas variações, seguindo todas as mesma tendência e o mesmo andamento.

As figuras Figura 4.19 e Figura 4.20 mostram as curvas associadas às ligas de classe B.

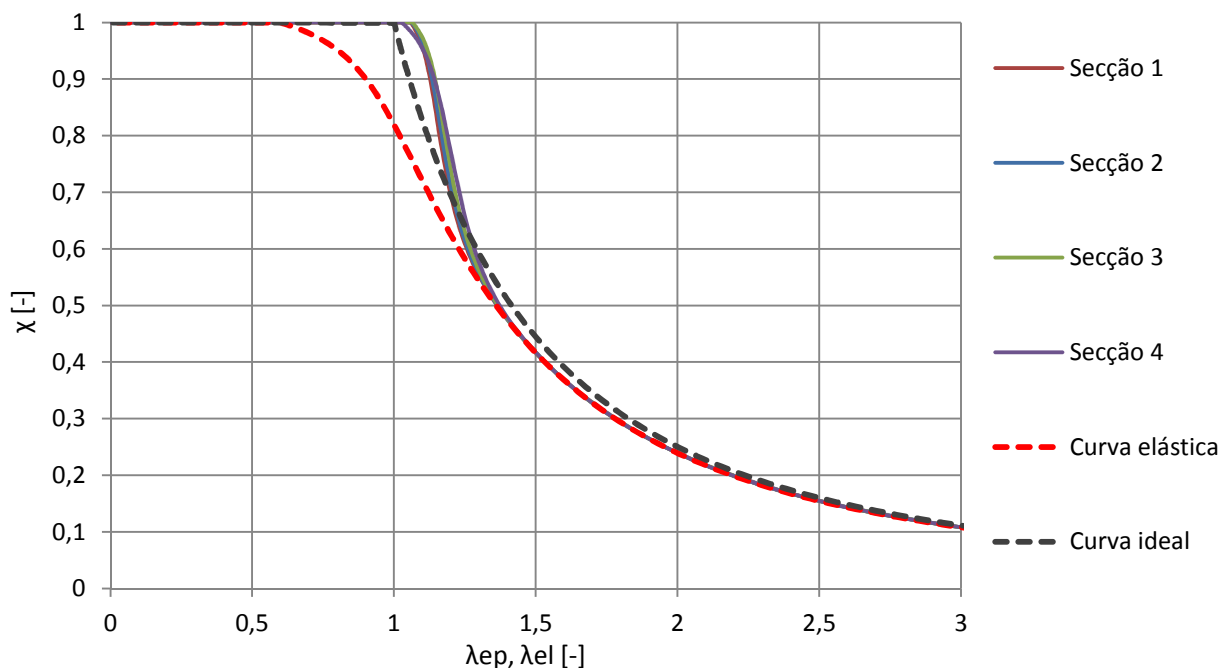


Figura 4.19. Curva de encurvadura para a liga 5083 H12 da classe B

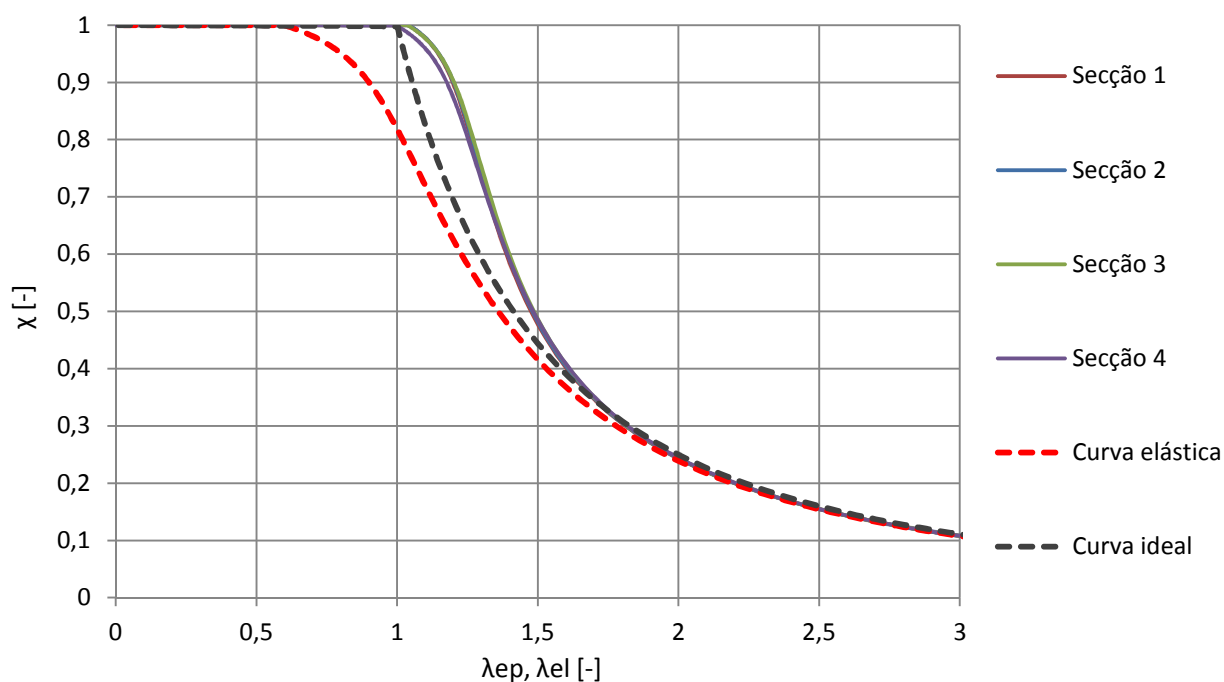


Figura 4.20. Curva de encurvadura para a liga 5083 H111 da classe B

Para as ligas da classe B, a comparação com o estudo levado a cabo na análise 1 mostra que contrariamente á dispersão das curvas observadas devido à consideração de diferentes ligas, a variação da secção transversal resulta em variações mínimas das curvas de dimensionamento. Das Análises 1 e 2, pode concluir-se que, para a classe A, e secções transversais de classe 1 e 2, tanto a escolha da liga como a escolha da secção transversal têm muito pouca influência nas curvas de dimensionamento. Por outro lado, para a classe B, muito embora a influência da escolha da secção transversal, para secções de classe 1 e 2, seja praticamente insignificante, a escolha da liga já produz diferenças consideráveis nas curvas de dimensionamento.

.

Capítulo 5

5. Análise numérica pelo método dos elementos finitos

5.1 Introdução

Neste capítulo efetua-se um estudo numérico da resistência à encurvadura de vigas de alumínio, contabilizando o efeito das imperfeições geométricas e da lei constitutiva elastoplástica do material (lei de Ramberg-Osgood). Para o efeito, recorre-se ao programa de elementos finitos ADINA [21], o qual foi já utilizado na Dissertação de Pena [4], para determinar cargas de colapso de colunas de alumínio.

5.2 Modelos e metodologia

Pretendeu-se com este estudo numérico, a obtenção de curvas de dimensionamento que pudessem ser comparadas à curva do EC9 e à curva da viga ideal. Para isso, foram analisadas as mesmas secções transversais presentes na análise 2 do capítulo anterior, para as mesmas ligas. As características das ligas seleccionadas são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Características das ligas seleccionadas para a análise numérica

Liga	Têmpera	f_0 [MPa]	f_u [MPa]	$f_{0,haz}$ [MPa]	$f_{u,haz}$ [MPa]	BC	n
5083	H12	200	280	135	270	B	14
5083	H111	110	270	110	270	B	5
6060	T6	140	170	60	100	A	24
6063	T66	200	245	75	130	A	22

As características geométricas das secções 1 e 2 podem ser consultadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Características das secções escolhidas

Secção transversal	b_f [mm]	t_f [mm]	h_w [mm]	t_w [mm]
1	100	10	110	10
2	50	10	110	10

A metodologia usada na construção das curvas de encurvadura através do ADINA, consistiu em escolher valores de esbelteza, elásticos e elastoplásticos, representativos (entre 0,6 e 2,0

aproximadamente), obtidos anteriormente com o MATLAB, e associar a cada um desses valores o coeficiente de redução calculado com o ADINA. Optou-se por se escolher sete diferentes valores de esbelteza, para que se obtivesse boa percepção das curvas calculadas com o ADINA.

A cada valor de esbelteza está associado um vão L (ver capítulo 4) e é a partir do valor do vão que é definida a esbelteza da secção no ADINA, isto é, a cada valor de esbelteza escolhido está associado um vão característico que é usado como vão dos modelos de vigas definidos no ADINA.

O cálculo do coeficiente de redução foi efetuado através da expressão:

$$\chi_{ADINA} = \frac{M_{ADINA}}{M_{pl}} \quad (5.2)$$

onde:

M_{ADINA} é o momento de colapso da viga obtido através do ADINA;

M_{pl} é o momento plástico da secção transversal (valor de cálculo do momento resistente da secção) definido em 3.39.

O momento de colapso, M_{ADINA} , pode ser calculado decompondo o carregamento aplicado (no colapso) em forças concentradas e multiplicando essas forças resultantes pelos correspondentes braços até ao centro de gravidade da secção.

Sendo F_1 a resultante do carregamento aplicado nos banzos e F_2 a resultante do carregamento aplicado na meia alma, vem:

$$F_1 = q * b_f \quad (5.3)$$

$$F_2 = \frac{q}{2} * \frac{h_w}{2} = q * h_w / 4 \quad (5.4)$$

onde q representa uma carga distribuída unitária.

O correspondente momento fletor pode ser calculado através do somatório das multiplicações das resultantes pelos correspondentes braços resultando:

$$M_{ATUANTE} = q * (b_f * (h_w + t_f) + \frac{h_w^2}{6}) \quad (5.5)$$

Substituindo na expressão anterior, q pela carga de colapso, $P_{colapso}$, o correspondente momento de colapso, M_{ADINA} , pode ser obtido através da expressão:

$$M_{ADINA} = P_{colapso} * \left(b_f * (h_w + t_f) + \frac{h_w^2}{6} \right) \quad (5.6)$$

onde

$P_{colapso}$ é a carga de colapso, obtida lendo no ADINA o valor do carregamento no colapso.

Como foi anteriormente explicado, os valores do coeficiente de redução obtidos através do ADINA serviram para calcular pontos das curvas elástica e elastoplástica fazendo corresponder ao coeficiente de redução, χ_{ADINA} , às esbeltezas, $\bar{\lambda}_{el}$ e $\bar{\lambda}_{ep}$, obtidas com o MATLAB.

5.3 Modelos numéricos

As análises efetuadas, para além de serem fisicamente não-lineares, são também geometricamente não-lineares. Para além disso, são consideradas as imperfeições geométricas equivalentes.

Nos modelos efetuados no programa ADINA, foram adotadas simplificações de simetria na direção longitudinal, tal como mostra a Figura 5.1.

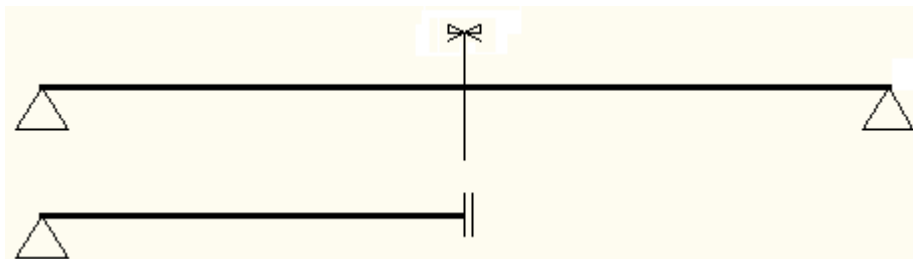


Figura 5.1 Simplificação de simetria considerada.

As imperfeições geométricas foram contabilizadas através de uma configuração inicial curva, dotada de uma excentricidade $L/1000$. Tal como foi referido na secção 2.12.1.1, a definição da curvatura inicial, resulta da consideração, no dimensionamento, das imperfeições geométricas dos perfis extrudidos, responsáveis pela diminuição da resistência das vigas à encurvadura. Considerou-se uma imperfeição $L/1000$, como recomenda o TALAT [20] (ver Figura 5.2).

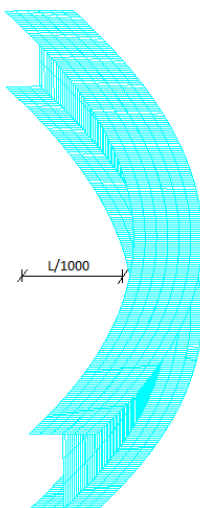


Figura 5.2. Viga com imperfeição geométrica (exagerada)

Esta configuração foi conseguida definindo as arestas da viga, na direção longitudinal, como arcos de circunferência, sendo que para isso, foi necessário definir o respetivo raio de curvatura, de acordo com a Figura 5.3.

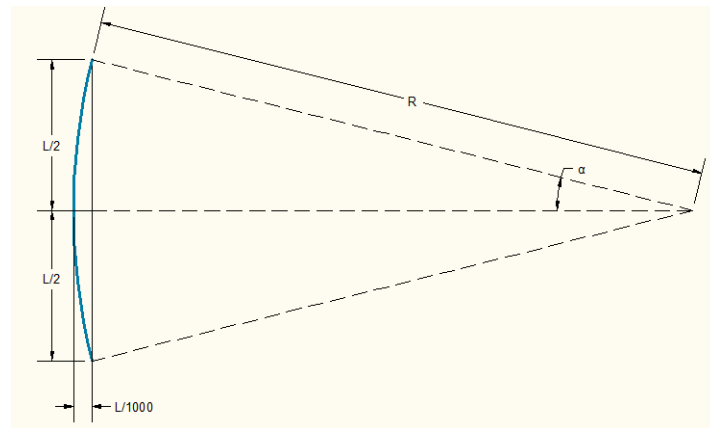


Figura 5.3. Raio de curvatura, R

Da análise da Figura 5.3 resulta a expressão 5.1, que permite o cálculo do raio de curvatura através do comprimento da viga, L.

$$R^2 = (L/2)^2 + (R - L/1000)^2 \quad (5.1)$$

A relação constitutiva elastoplástica é definida através do modelo multilinear do ADINA, no qual é possível introduzir os valores das tensões e das correspondentes extensões, de acordo com a lei de Ramberg-Osgood (expressão 2.1). As leis constitutivas, para cada liga, podem ser observadas nas Figura 5.4, Figura 5.5, Figura 5.6 e Figura 5.7.

A análise física não linear foi conseguida através da definição de uma relação constitutiva elastoplástica multilinear no ADINA, executada através da introdução dos valores das tensões e correspondentes extensão (lei material), calculados através da lei de Ramberg-Osgood (expressão 2.1). As leis constitutivas, para cada liga, podem ser observadas nas Figura 5.4, Figura 5.5, Figura 5.6 e Figura 5.7.

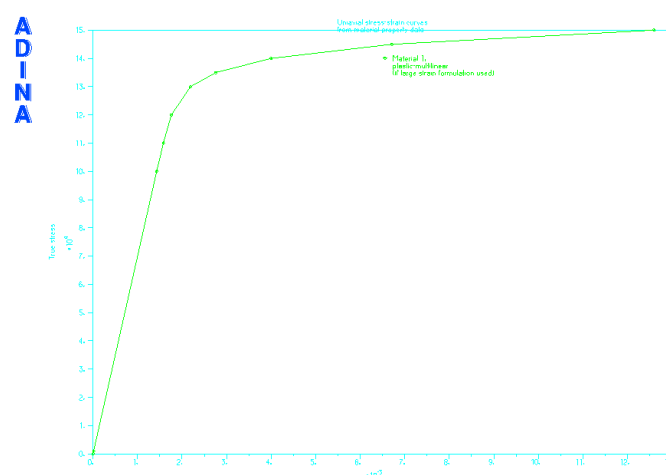


Figura 5.4. Lei material para a liga 6060 T6 da classe A

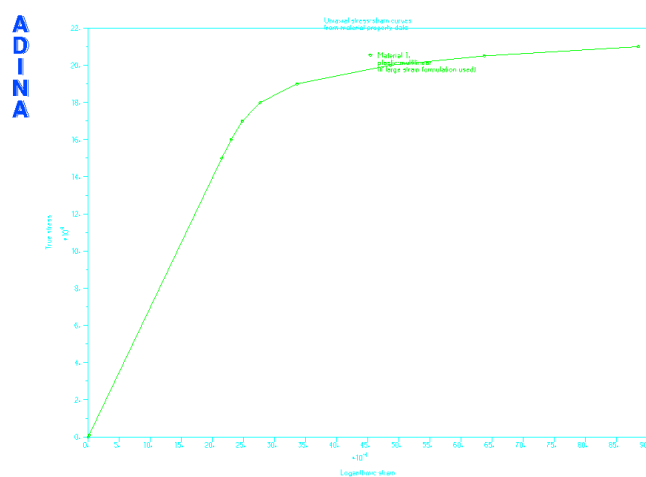


Figura 5.5. Lei material para a liga 6063 T6 da classe A

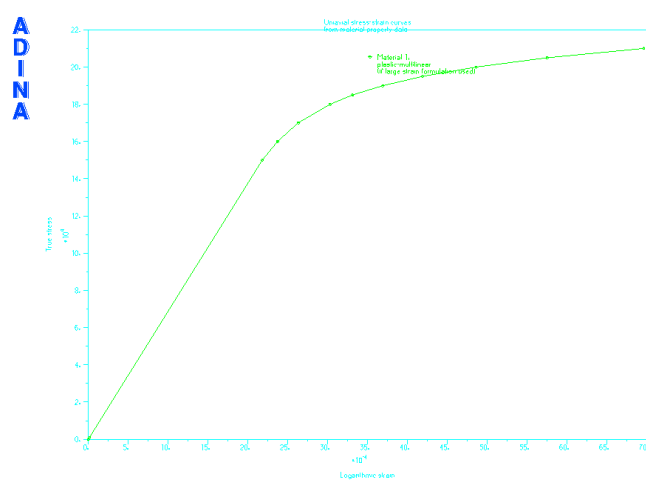


Figura 5.6. Lei material para a liga 5083 H12 da classe B

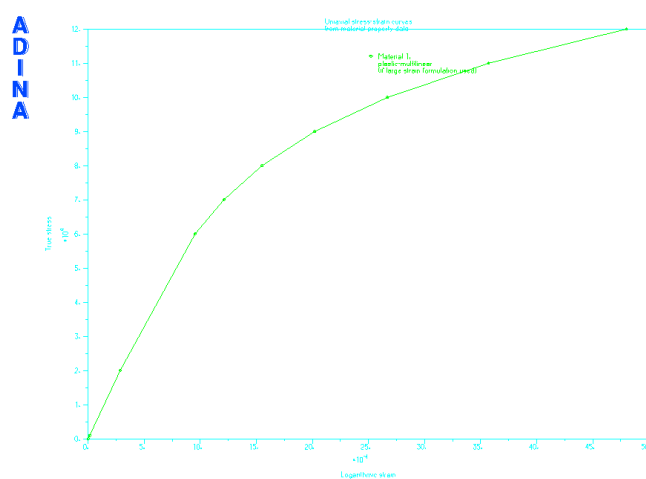


Figura 5.7. Lei material para a liga 5083 H111 da classe B

A malha de elementos finitos é constituída por elementos do tipo casca, de nove nós. A densidade da malha de elementos finitos, pretendeu o equilíbrio entre a de precisão dos resultados obtidos e a velocidade de cálculo do programa.

A definição do carregamento teve como objetivo a simulação da aplicação de momentos fletores nas extremidades da viga. Tal foi conseguido através da aplicação uma carga distribuída, na linha média da secção de extremidade, de valor máximo unitário. A forma do carregamento pode ser observada na Figura 5.8.

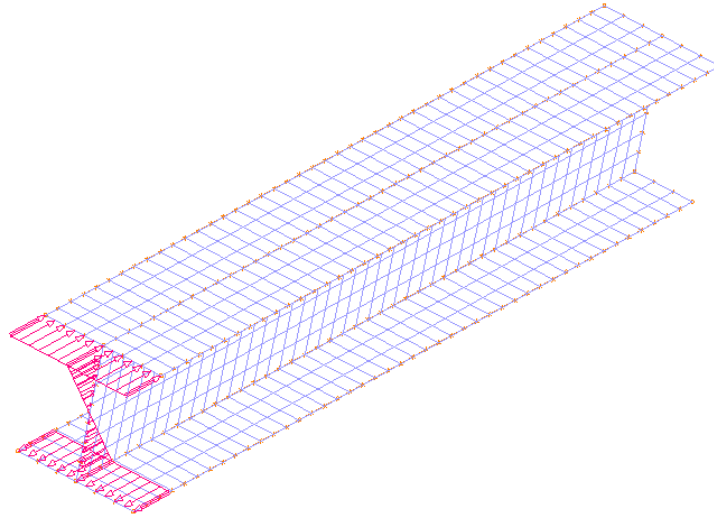


Figura 5.8. Carregamento na secção de extremidade

Para que o comportamento da viga pudesse ser analisado até ao colapso, adotou-se uma estratégia incremental de carga, com incrementos ajustados automaticamente pelo programa em caso de falta de convergência. A análise cessa quando não é possível obter convergência para um valor reduzido do incremento de carga.

5.4 Resultados Numéricos

A generalidade dos modelos estudados apresentou uma deformada no colapso similar. A deformada-tipo no colapso, bem como o respetivo gráfico carga-deslocamento, podem ser observados nas Figura 5.9 e Figura 5.10. Contudo, em alguns casos, a viga atingiu grandes rotações, tal como se mostra nas Figura 5.11 e Figura 5.12. Os valores dos deslocamentos foram lidos, a meio vão, no ponto extremo do banzo superior.

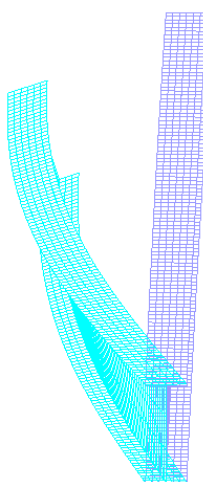


Figura 5.9. Deformada-tipo no colapso

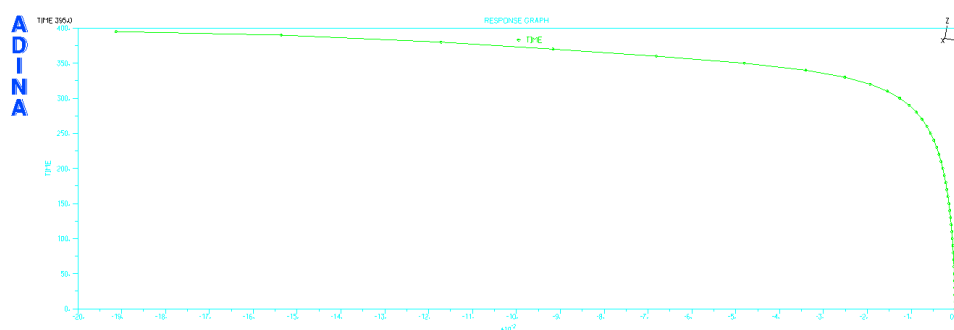


Figura 5.10. Gráfico carga – deslocamento tipo (segundo y)

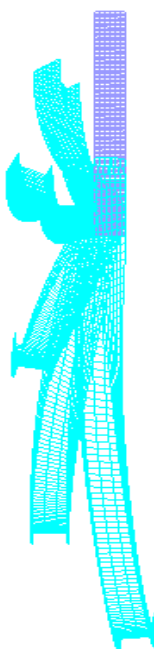


Figura 5.11. Deformada no colapso para os modelos com grandes rotações

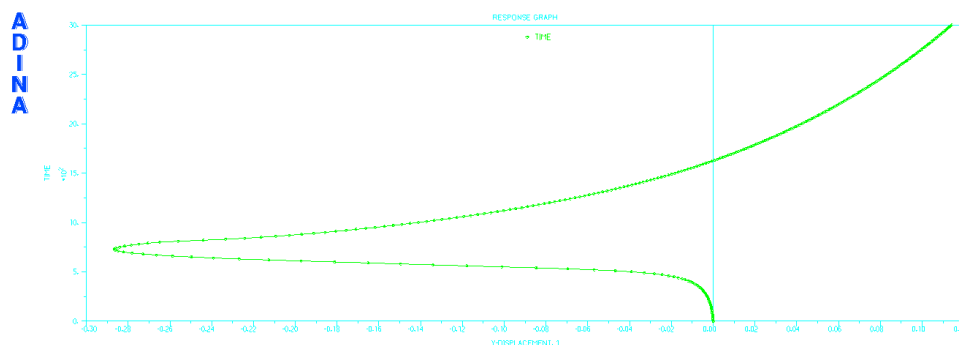


Figura 5.12. Gráfico carga – deslocamento (segundo y), para os modelos com grandes rotações

Para os casos em que as vigas apresentaram deformações bastante elevadas, a carga de colapso foi considerada como a carga imediatamente antes da inversão da tendência do gráfico carga-deslocamento (ver Figura 5.12). Os valores assim obtidos para as cargas de colapso, foram consistentes com os casos onde as deformações das vigas não chegam a provocar este fenómeno.

Para a liga 6060 T6 e secção 1, obtiveram-se, com o ADINA, os resultados apresentados na Tabela 5.3 e representados na Figura 5.13.

Tabela 5.3. Coeficientes de redução obtidos com o ADINA, para a liga 6060 T6 com secção 1

Coeficiente de redução	0,884	0,716	0,584	0,447	0,370	0,366	0,347	0,240	0,160
Esbelteza elástica	0,600	1,022	1,254	1,501	1,747	1,862	1,993	2,527	3,000
Esbelteza elastoplástica	1,063	1,135	1,257	1,501	1,748	1,862	1,993	2,527	3,000
L (m)	1,33	3,08	4,47	6,29	8,47	9,60	10,97	17,57	25,98

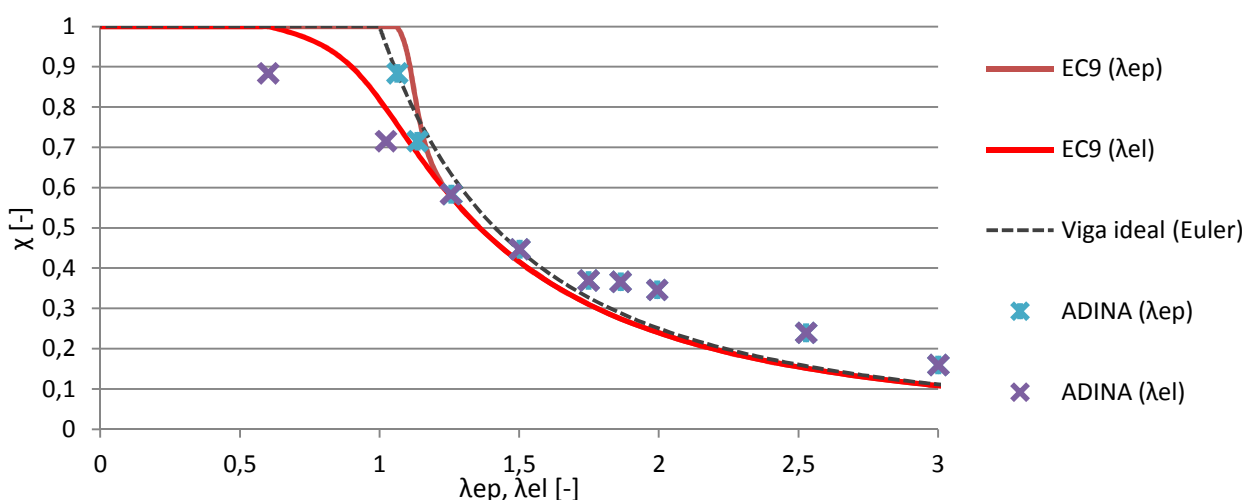


Figura 5.13. Resultados numéricos da liga 6060 T6 para a secção 1

Ainda para a liga 6060 T6, mas para a secção 2, obtiveram-se, através do ADINA, os seguintes resultados:

Tabela 5.4. Coeficientes de redução obtidos com o ADINA, para a liga 6060 T6 com secção 2

Coeficiente de redução	0,875	0,679	0,523	0,393	0,308	0,288	0,251	0,209	0,171
Esbelteza elástica	0,607	1,016	1,271	1,518	1,763	1,837	2,005	2,526	2,952
Esbelteza elastoplástica	1,073	1,156	1,275	1,518	1,763	1,837	2,005	2,526	2,952
L (m)	0,64	1,49	2,26	3,19	4,27	4,63	5,51	8,73	11,91

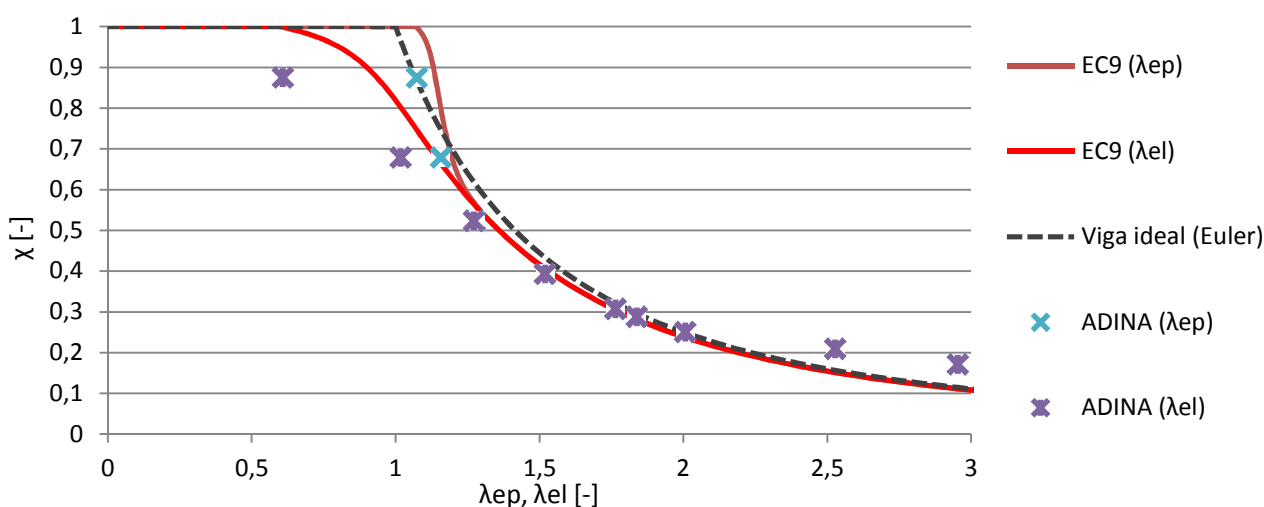


Figura 5.14. Resultados numéricos da liga 6060 T6 para a secção 2

Repare-se que até um dado valor de esbelteza, consoante a secção, os resultados obtidos com o ADINA são inferiores aos do EC9, estando este contra a segurança. Por outro lado, a partir de certos valores de esbelteza, dependendo da secção, os resultados obtidos através do ADINA são superiores aos da curva da viga ideal. Este fenómeno não foi explicado na presente dissertação, sugerindo-se desde já, a sua análise em estudos futuros.

Os resultados obtidos para a liga 6063 T66 e secção 1 são apresentados na Tabela 5.5:

Tabela 5.5. Coeficientes de redução obtidos com o ADINA, para a liga 6063 T66 com secção 1

Coeficiente de redução	0,840	0,685	0,553	0,424	0,358	0,347	0,329
Esbelteza elástica	0,610	1,014	1,257	1,502	1,762	1,859	2,006
Esbelteza elastoplástica	1,062	1,133	1,260	1,502	1,762	1,859	2,006
L (m)	1,07	2,24	3,24	4,49	6,08	6,75	7,82

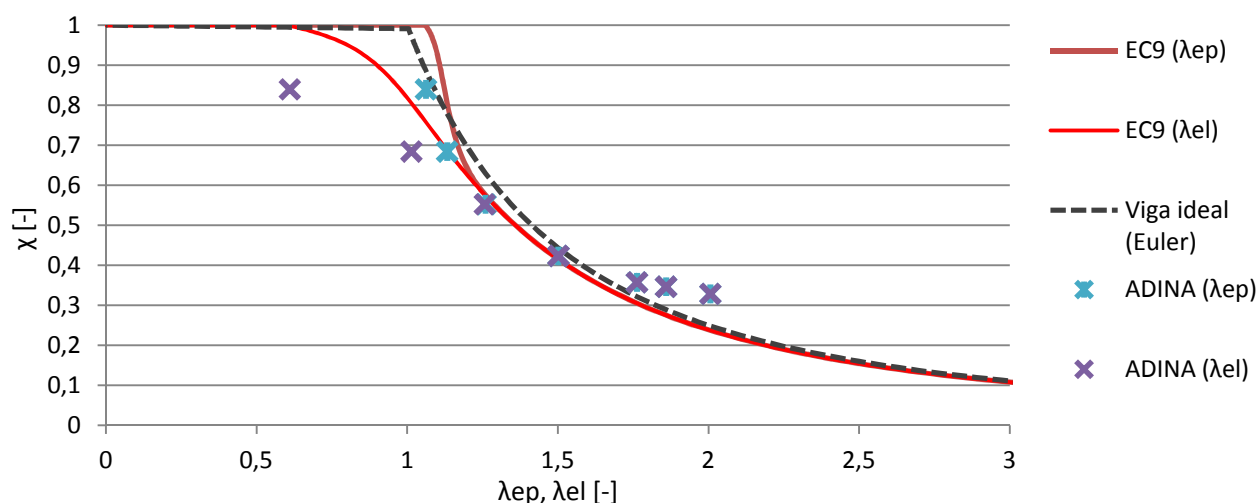


Figura 5.15. Resultados numéricos da liga 6063 T66 para a secção 1

Ainda para a liga 6063T66, mas para a secção 2, obtiveram-se, através do ADINA os seguintes resultados:

Tabela 5.6. Coeficientes de redução obtidos com o ADINA, para a liga 6063 T66 com secção 2

Coeficiente de redução (ADINA)	0,838	0,645	0,503	0,378	0,293	0,269	0,233
Esbelteza elástica (MATLAB)	0,600	1,017	1,259	1,502	1,754	1,847	2,026
Esbelteza elastoplástica (MATLAB)	1,071	1,155	1,266	1,502	1,754	1,847	2,026
L (m)	0,50	1,09	1,59	2,21	2,98	3,30	3,95

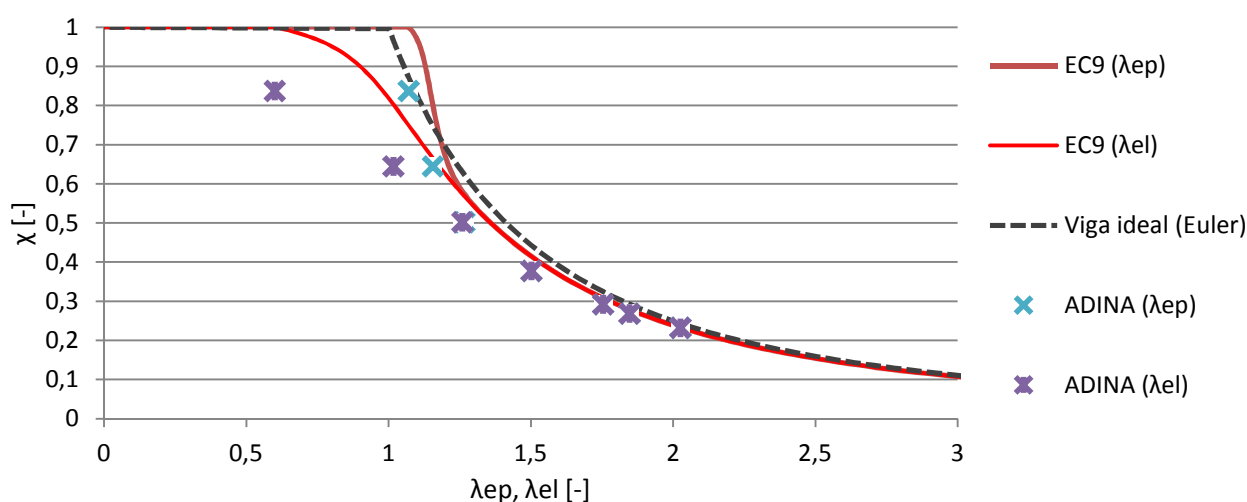


Figura 5.16. Resultados numéricos da liga 6063 T66 para a secção 2

Analogamente ao que se verificou para a liga 6060 T6, existem valores de esbelteza para os quais os resultados do ADINA são inferiores aos do EC9 e valores de esbelteza onde os resultados obtidos com o ADINA se são superiores aos da curva da viga ideal.

A Tabela 5.7 mostra os resultados da liga 5083 H12 para a classe 1, enquanto a Figura 5.17 representa-os graficamente.

Tabela 5.7. Coeficientes de redução obtidos com o ADINA, para a liga 5083 H12 com secção 1

Coeficiente de redução	0,891	0,703	0,567	0,438	0,373	0,359	0,341
Esbelteza elástica	0,599	1,006	1,259	1,502	1,762	1,859	2,006
Esbelteza elastoplástica	1,059	1,156	1,278	1,502	1,762	1,859	2,006
L (m)	1,05	2,21	3,25	4,49	6,08	6,75	7,82

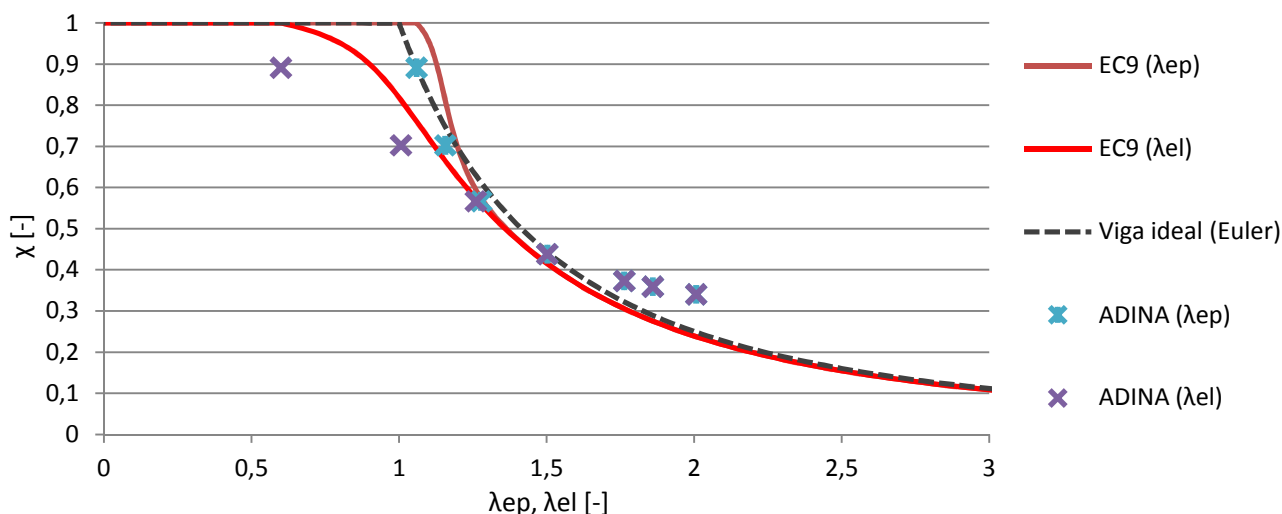


Figura 5.17. Resultados numéricos da liga 5083 H12 para a secção 1

Para a mesma liga mas para a classe 2, os resultados obtidos com o ADINA são apresentados na Tabela 5.8 e na Figura 5.18.

Tabela 5.8. Coeficientes de redução obtidos com o ADINA, para a liga 5083 H12 com secção 2

Coeficiente de redução	0,885	0,660	0,521	0,392	0,303	0,279	0,249
Esbelteza elástica	0,604	1,017	1,254	1,501	1,754	1,847	1,987
Esbelteza elastoplástica	1,066	1,179	1,285	1,502	1,754	1,847	1,987
L (m)	0,50	1,09	1,58	2,21	2,98	3,30	3,81

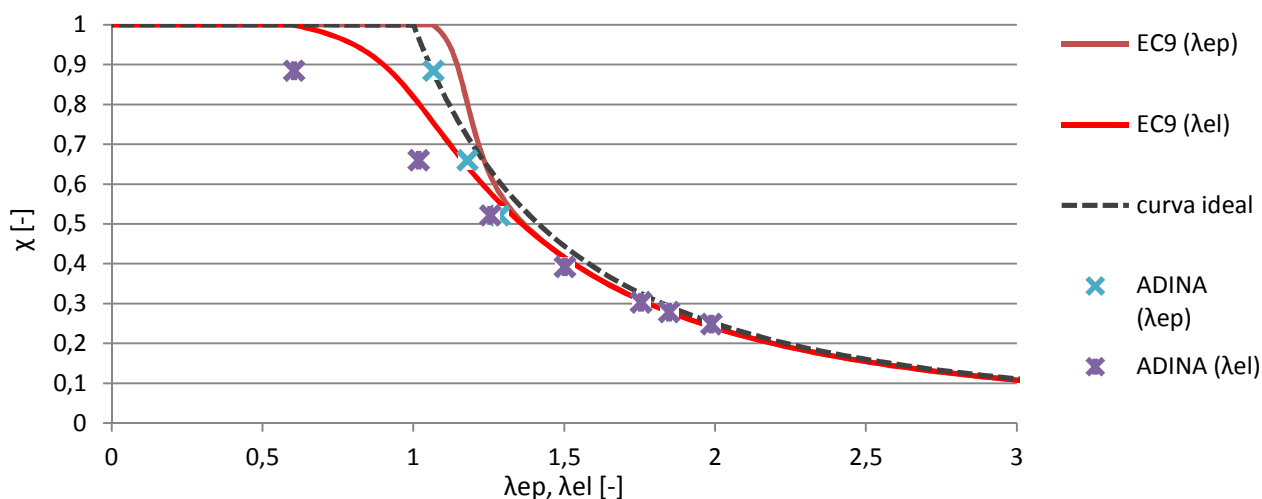


Figura 5.18. Resultados numéricos da liga 5083 H12 para a secção 2

Mais uma vez, os resultados anteriores exibem as mesmas características dos que lhe antecedem. Finalmente, para a liga 5083 H111, os resultados obtidos com o ADINA foram compilados na Tabela 5.9 e representados na Figura 5.19, para a classe 1.

Tabela 5.9. Coeficientes de redução obtidos com o ADINA, para a liga 5083 H111 com secção 1

Coeficiente de redução	0,915	0,613	0,498	0,394	0,318	0,308	0,288
Esbelteza elástica	0,604	1,010	1,245	1,502	1,744	1,837	2,048
Esbelteza elastoplástica	1,044	1,259	1,399	1,581	1,781	1,864	2,061
L (m)	1,60	3,75	5,54	7,97	10,70	11,85	14,70

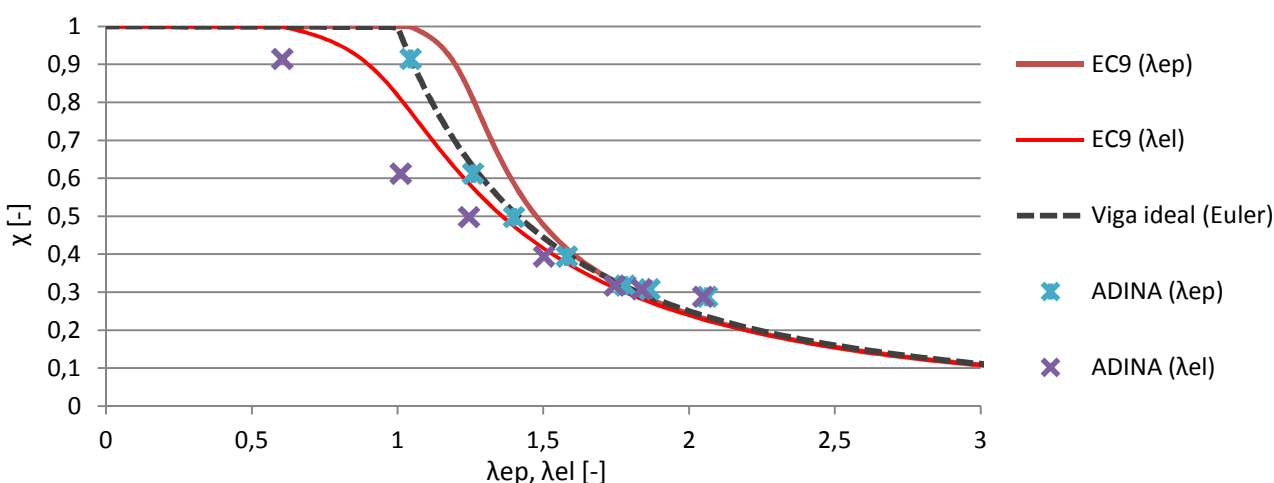
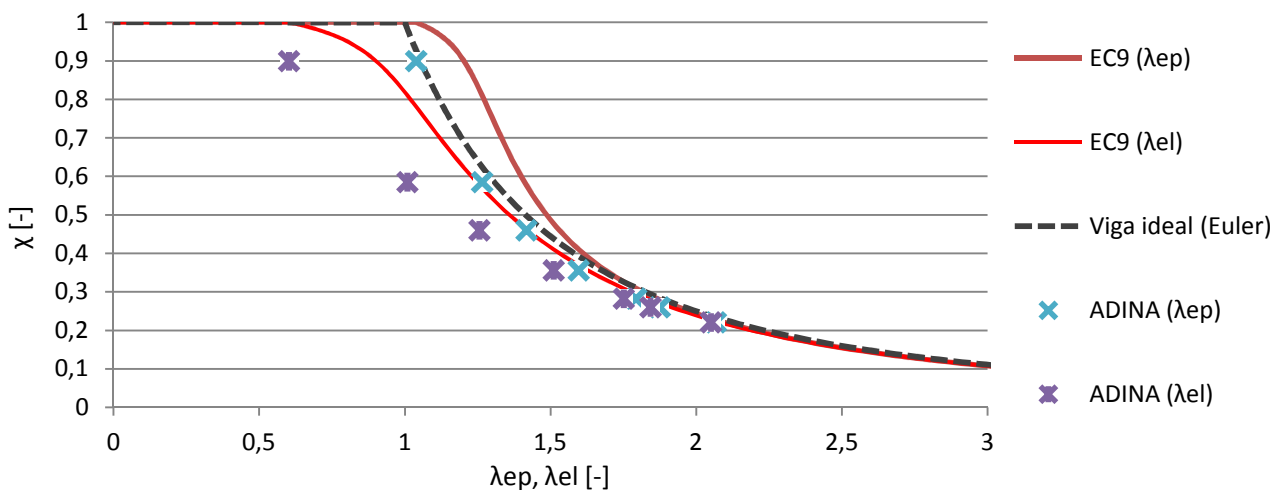


Figura 5.19. Resultados numéricos da liga 5083 H111 para a secção 1

Ainda para a mesma liga mas agora para a secção 2, os resultados obtidos foram:

Tabela 5.10. Coeficientes de redução obtidos com o ADINA, para a liga 5083 H111 com secção 1

Coeficiente de redução	0,900	0,585	0,460	0,356	0,283	0,260	0,221
Esbelteza elástica	0,602	1,008	1,256	1,510	1,751	1,843	2,050
Esbelteza elastoplástica	1,039	1,265	1,417	1,596	1,793	1,874	2,067
L (m)	0,76	1,83	2,79	4,00	5,35	5,92	7,32

**Figura 5.20. Resultados numéricos da liga 5083 H111 para a secção 2**

Os resultados apresentados na Figura 5.21 são em tudo semelhantes aos apresentados para as ligas 6061 T6, 6063 T66 e 5083H12.

Grande parte dos resultados obtidos através da análise com o ADINA, apresentam resistências menores que as do EC9, que, se assim for verificado, se encontra contra a segurança, o que vem realçar as vantagens da metodologia proposta.

As Figura 5.21, Figura 5.22, Figura 5.23 e Figura 5.24, reúnem todos os resultados obtidos, por secção e em função da esbelteza elástica ou elastoplástica.

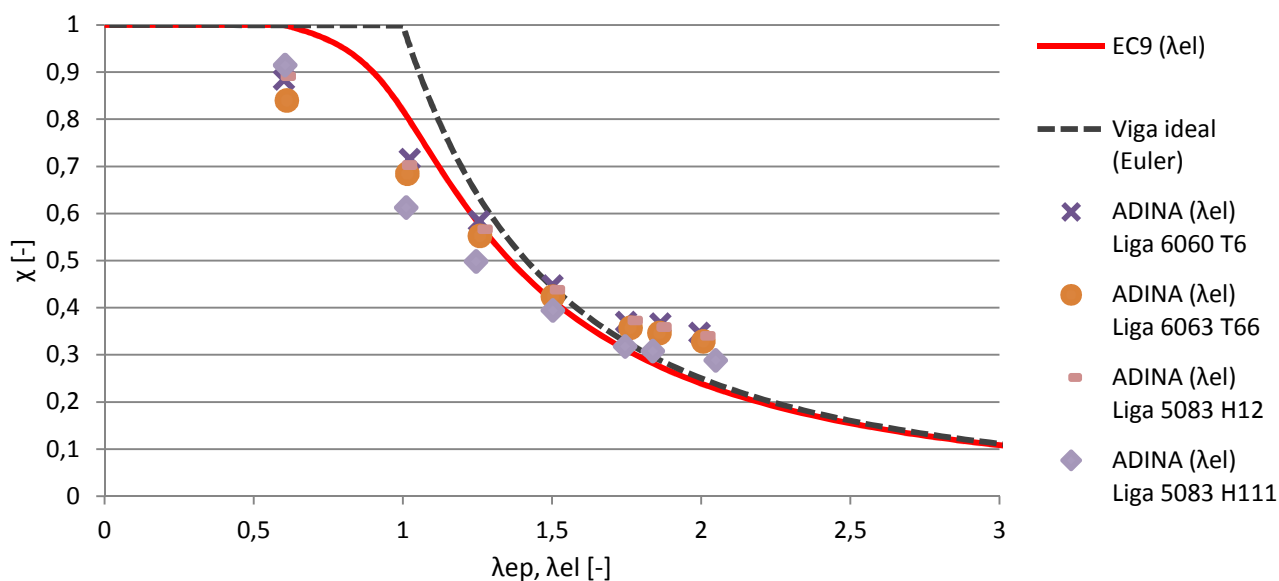


Figura 5.21. Resultados numéricos “elásticos” para a secção 1

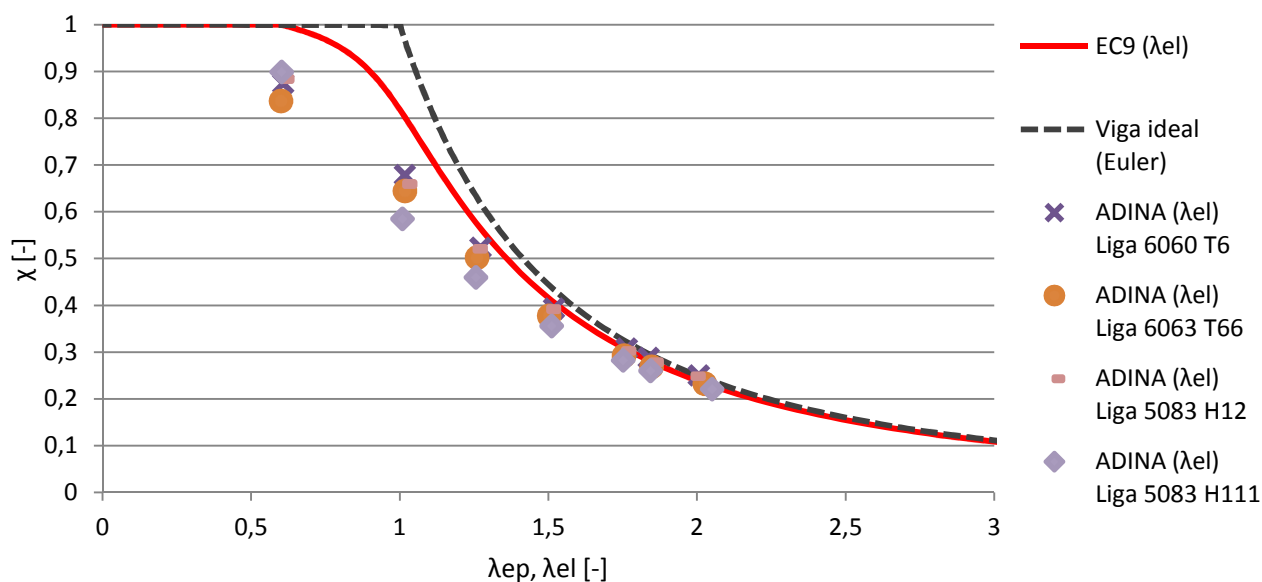
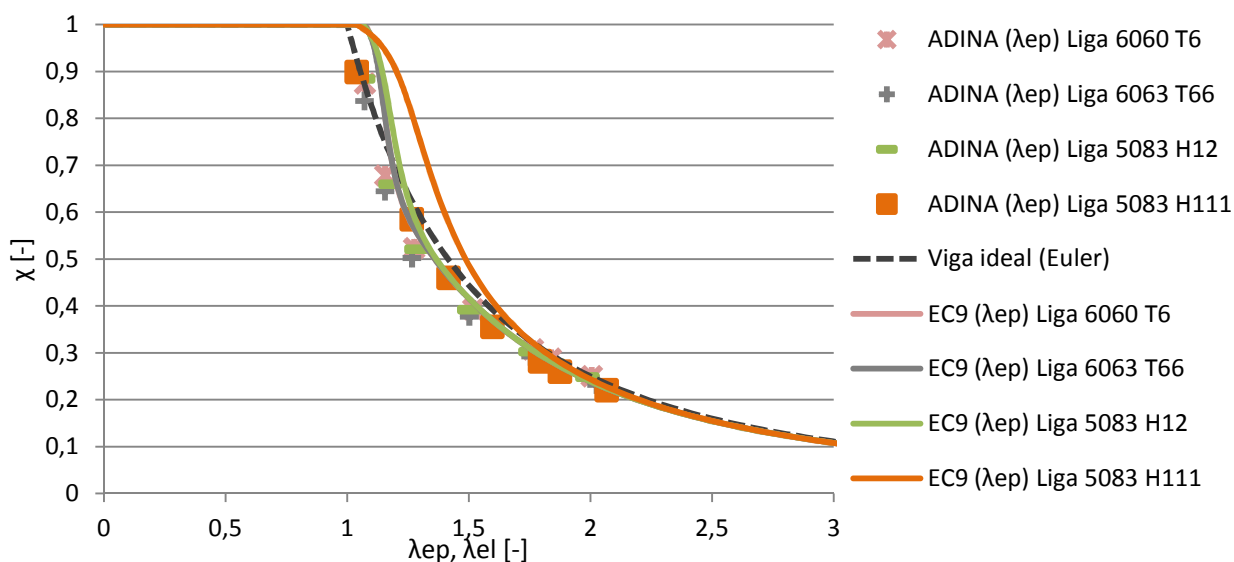
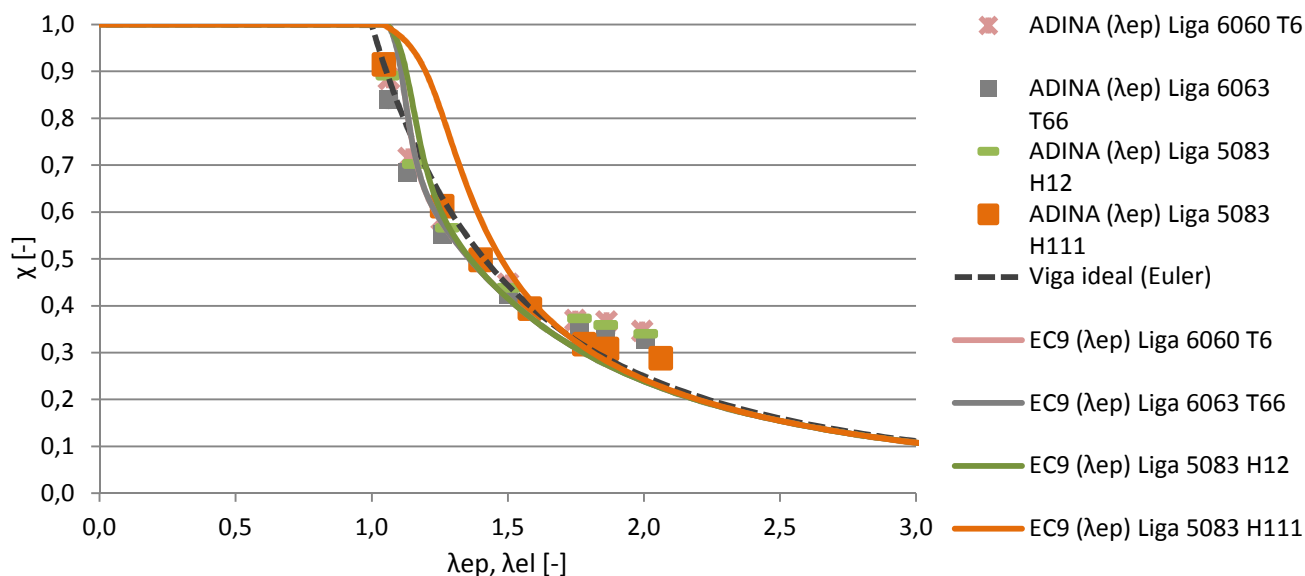


Figura 5.22. Resultados numéricos “elásticos” para a secção 2



A análise das Figura 5.23, Figura 5.24, Figura 5.21 e Figura 5.22, mostra que existe uma menor dispersão dos resultados quando estes são representados em função da esbelteza elastoplástica. Para além de confirmar os resultados obtidos por Pena para colunas de alumínio [4], estes resultados comprovam que existe alguma vantagem em adotar o método proposto.

Ainda através da análise das figuras anteriores, é possível verificar que os resultados obtidos com o ADINA, na generalidade dos casos, se encontram abaixo das curvas do EC9.

5.5 Aplicação da metodologia aos resultados experimentais obtidos por Y.Q. Wang et al[1]

O método proposto foi ainda aplicado aos resultados experimentais obtidos por Y.Q. Wang, H.X. Yuan, Y.J. Shi e M. Cheng [1]. Estes autores testaram até ao colapso vigas de alumínio, simplesmente apoiadas sujeitas a flexão pura, mas encastradas no apoio na direção de menor inércia, com restrição de empenamento. Foram utilizadas as ligas 6061 T6 e 6063 T5, de classe A e B respetivamente, cujas propriedades medidas em laboratório são indicadas na Tabela 5.11 [1].

Tabela 5.11. Características físicas dos modelos ensaiados [1]

Liga	f_o [MPa]	f_u [MPa]	E [MPa]	n
6061 T6	285	296	57500	30
6063 T5	145	182	53000	15

As Figura 5.25 e Figura 5.26 mostram as curvas tensão-extensão determinadas pelos autores [1].

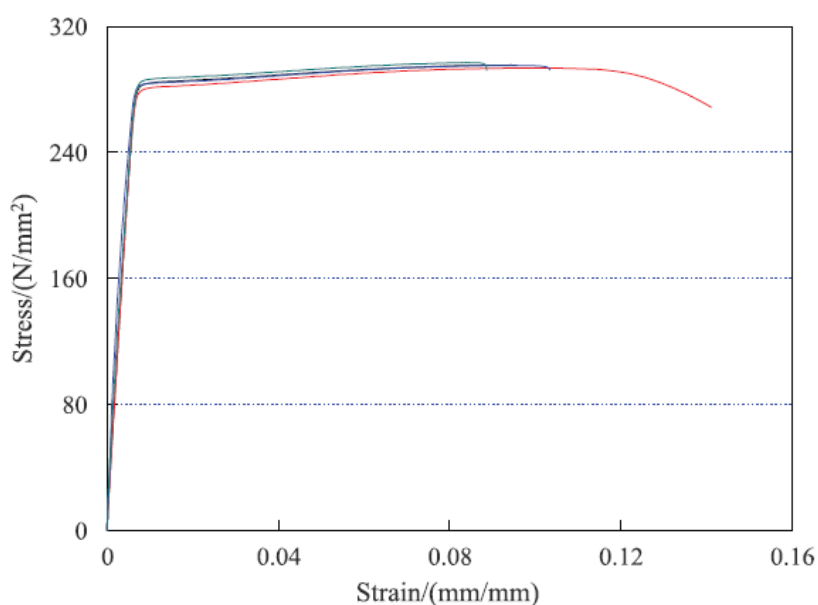


Figura 5.25. Lei material para a liga 6061 T6 [1]

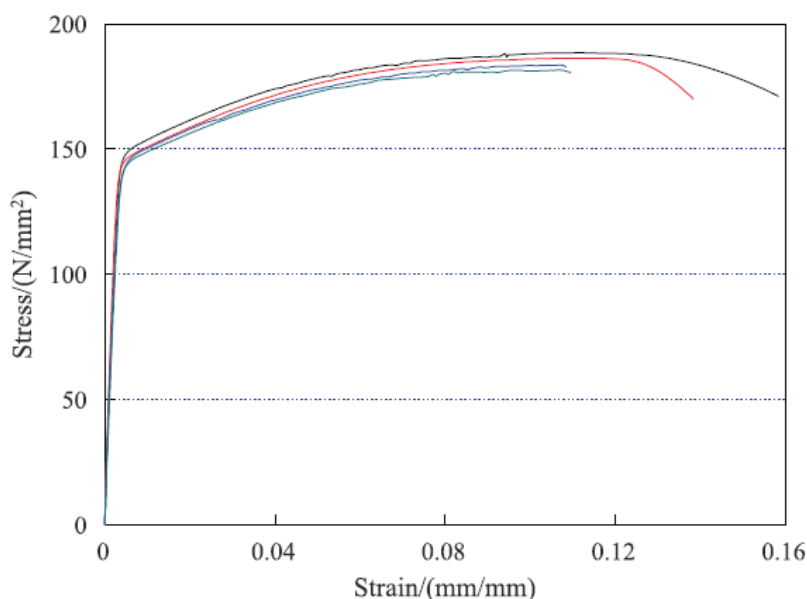


Figura 5.26. Lei material par a liga 6063 T5 [1]

Para cada liga foram testadas seis vigas, com a geometria indicada nas Tabela 5.12 e Tabela 5.13.

Tabela 5.12. Parâmetros geométricos das vigas da liga 6061 T6 [1]

Dados	Viga 1	Viga 2	Viga 3	Viga 4	Viga 5	Viga 6
L (m)	1,25	1,05	0,85	0,70	0,58	0,48
b_f (mm)	17,78	17,62	18,02	16,88	17,92	17,70
t_f (mm)	3,92	3,94	3,94	3,88	3,92	3,94
h_w (mm)	92,30	92,20	92,14	92,32	91,94	92,08
t_w (mm)	2,84	2,86	2,84	2,82	2,86	2,90

Tabela 5.13. Parâmetros geométricos das vigas da liga 6063 T5 [1]

Dados	Viga 1	Viga 2	Viga 3	Viga 4	Viga 5	Viga 6
L (m)	1,5	1,25	1,05	0,85	0,70	0,60
b_f (mm)	17,64	17,84	17,98	17,42	17,76	17,78
t_f (mm)	3,92	3,94	3,94	3,94	3,96	3,92
h_w (mm)	92,12	92,18	92,02	91,98	92,08	92,16
t_w (mm)	2,86	2,92	2,88	2,86	2,86	2,90

Note-se que estas secções são bastante mais esbeltas que as secções que foram estudadas na secção anterior e apresentam banzos relativamente estreitos.

O facto de estes ensaios terem sido efetuados com condições de apoio diferentes das consideradas anteriormente (vigas simplesmente apoiadas), tornou necessário efetuar uma adaptação ao programa em MATLAB, ao nível do cálculo do momento crítico. Assim, para as novas condições de apoio, tem-se agora [23]:

$$M_{cr,ep} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(K_z L)^2} \sqrt{\left(\frac{K_z}{K_w}\right)^2 \cdot \frac{EI_w}{EI_z} + \frac{(K_z L)^2 GJ}{\pi^2 EI_z}} \quad (5.7)$$

$$M_{cr,el} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(K_z L)^2} \sqrt{\left(\frac{K_z}{K_w}\right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(K_z L)^2 GJ}{\pi^2 EI_z}} \quad (5.8)$$

onde

$$K_w = K_z = 0,5;$$

$$C_1 = 1,0 \quad \text{se } \frac{\pi}{K_w L} \sqrt{\frac{EI_w}{GJ}} \leq 1 \quad (5.9)$$

$$C_1 = 1,05 \quad \text{se } \frac{\pi}{K_w L} \sqrt{\frac{EI_w}{GJ}} > 1 \quad (5.10)$$

Os resultados obtidos são apresentados nas Tabela 5.14 e Tabela 5.15.

Tabela 5.14. Resultados obtidos para a liga 6061 T6

Dados		Viga 1	Viga 2	Viga 3	Viga 4	Viga 5	Viga 6
M_u	(kN m) [1]	0,517	0,636	0,842	1,055	1,521	1,873
M_{Rd}	(kN m)	3,635	1,489	3,662	3,508	3,642	3,660
$M_{cr,el}$	(kN m)	0,536	0,664	0,923	1,035	1,694	2,264
$\bar{\lambda}_{el}$	[-]	2,603	1,498	1,992	1,841	1,466	1,272
$M_{cr,ep}$	(kN m)	0,633	0,789	1,110	1,252	1,983	2,508
$\bar{\lambda}_{ep}$	[-]	2,396	1,374	1,817	1,674	1,355	1,208
χ	[-]	0,142	0,427	0,230	0,301	0,418	0,512

Tabela 5.15. Resultados obtidos para a liga 6063 T5

Dados		Viga 1	Viga 2	Viga 3	Viga 4	Viga 5	Viga 6
M_u	(kN m) [1]	0,413	0,494	0,650	0,814	1,085	1,009
M_{Rd}	(kN m)	1,843	1,489	1,870	1,832	1,858	1,864
$M_{cr,el}$	(kN m)	0,406	0,526	0,658	0,813	1,125	1,489
$\bar{\lambda}_{el}$	[-]	2,131	1,683	1,685	1,501	1,285	1,119
$M_{cr,ep}$	(kN m)	0,490	0,663	0,821	1,001	1,174	1,246
$\bar{\lambda}_{ep}$	[-]	1,940	1,499	1,509	1,353	1,258	1,223
χ	[-]	0,224	0,332	0,348	0,444	0,584	0,541

Os resultados obtidos são apresentados graficamente nas Figura 5.27 e Figura 5.28 (esbelteza elástica) e nas Figura 5.29 e Figura 5.30 (esbelteza elastoplástica). Embora as secções ensaiadas experimentalmente sejam, geometricamente, mais próximas da secção 2 estudada com o ADINA, compararam-se os resultados para ambas as secções (1 e 2).

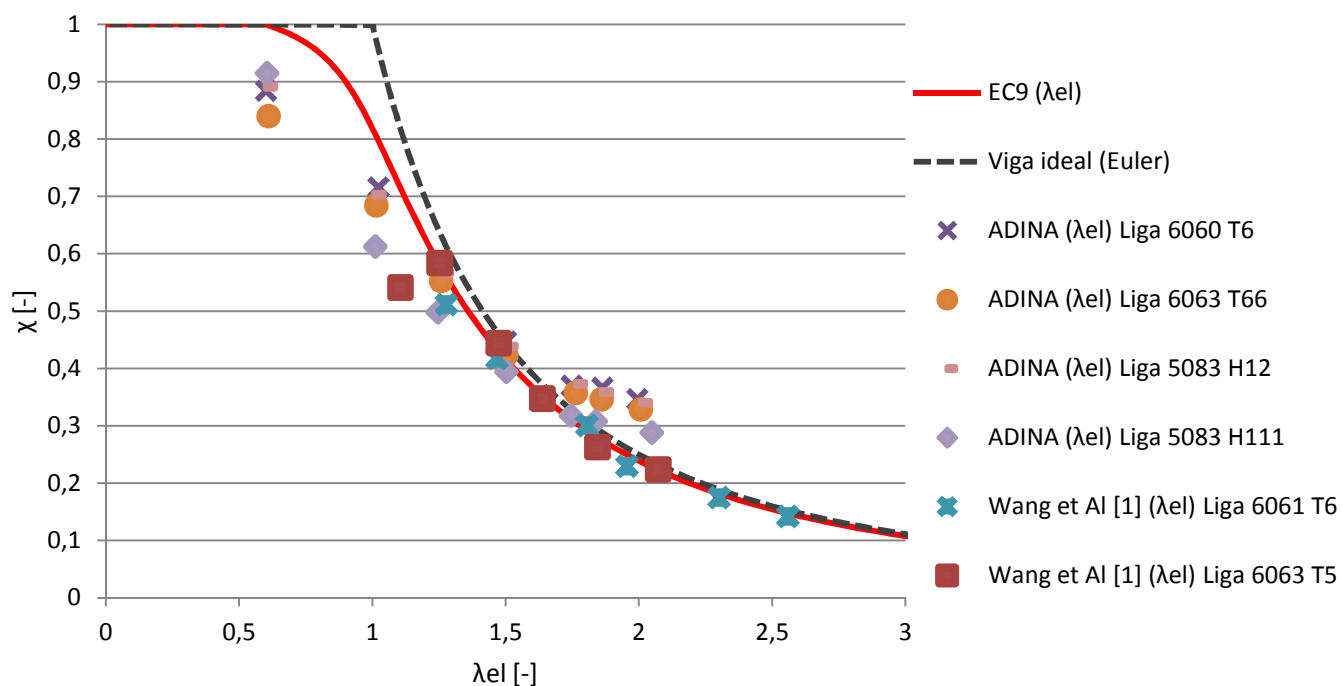


Figura 5.27. Comparação dos resultados "elásticos" para a secção 1

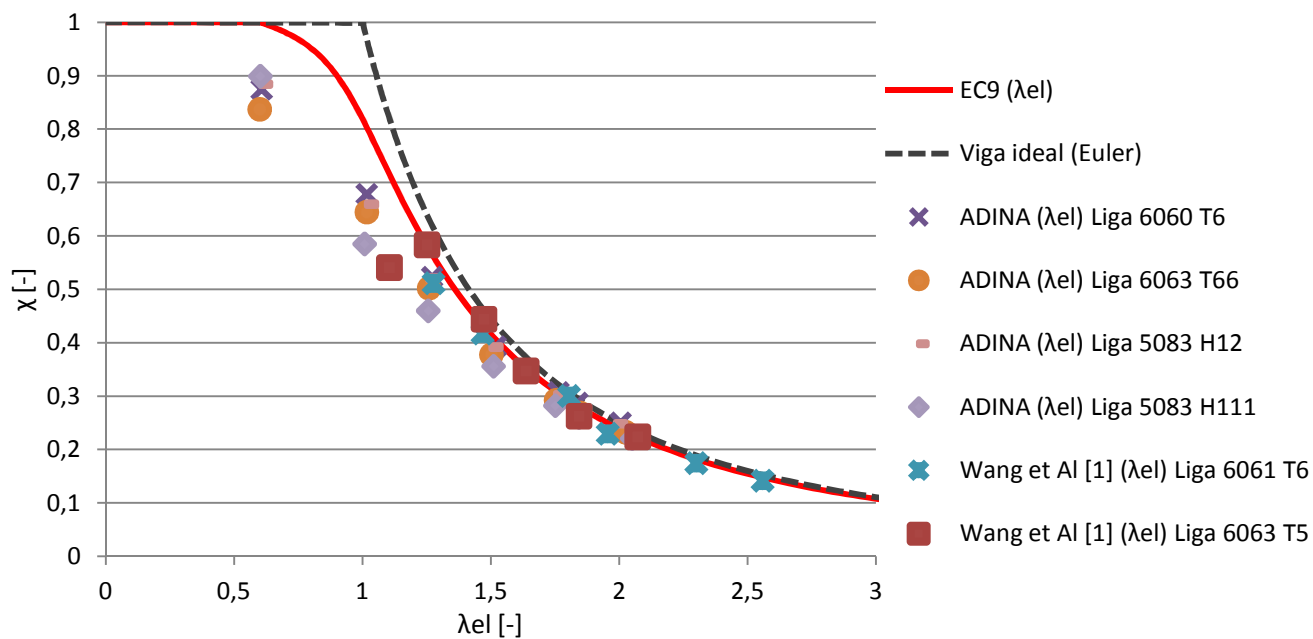


Figura 5.28. Comparação dos resultados "elásticos" para a secção 2

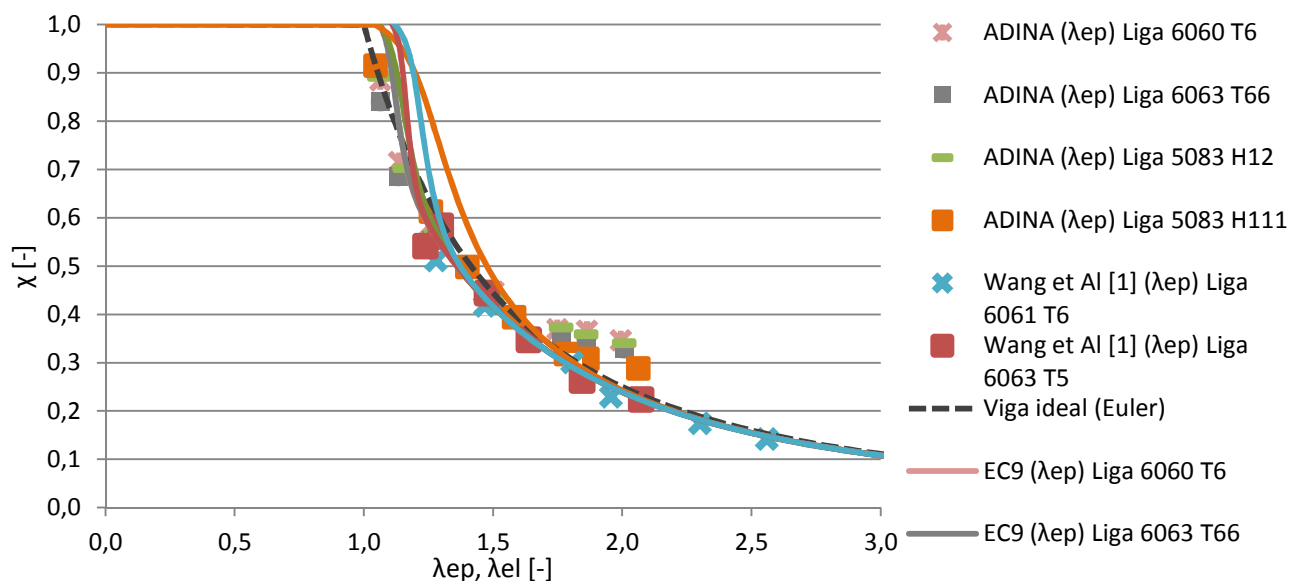


Figura 5.29. Comparação dos resultados "elastoplásticos" para a secção 1

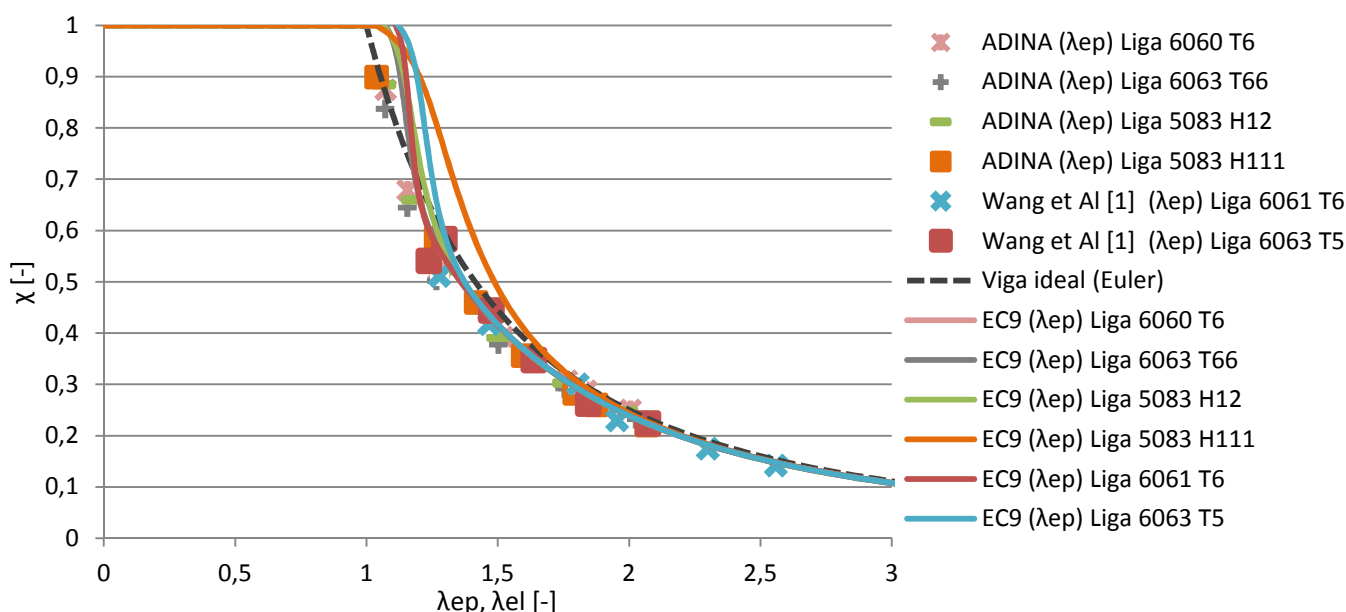


Figura 5.30. Comparação dos resultados "elastoplásticos" para a secção 2

Como era de esperar, os resultados experimentais encontram-se mais próximos dos da secção 2, em virtude da semelhança geométrica. Os resultados "elásticos" parecem mostrar que o EC9 poderá, para alguns valores de esbeltezas, estar contra a segurança. Os resultados "elastoplásticos" situam-se abaixo das curvas de dimensionamento do EC9 na generalidade dos casos. No entanto, tanto para os resultados "elásticos" como para os resultados "elastoplásticos", para alguns valores de esbelteza, os resultados invertem esta tendência superando mesmo as curvas do EC9 (ver as Figura 5.27 e Figura 5.29).

Capítulo 6

6. Conclusões e desenvolvimentos futuros

6.1 Conclusões

A presente dissertação teve como objetivo a análise do comportamento de vigas de alumínio aos efeitos da encurvadura lateral por flexão-torção. Em particular, investigou-se uma abordagem alternativa à do EC9, que consiste em utilizar uma esbelteza da viga que é função da carga crítica elasto-plástica. Para esse efeito, foi desenvolvido um programa de cálculo automático em MATLAB, de modo a resolver numericamente o problema do cálculo das tensões de pré-encurvadura e das cargas críticas elasto-plásticas.

Ao traçar a curva de dimensionamento de vigas do EC9 usando esbeltezas elasto-plásticas para cada uma das ligas estudadas, verificou-se que, enquanto para as ligas de classe A as curvas se encontram praticamente sobrepostas, para as ligas de classe B a dispersão é mais acentuada. Este resultado mostra que a abordagem utilizada não permite utilizar, para ligas de classe B e de acordo com o EC9, a consideração de uma única curva de dimensionamento.

De seguida, procedeu-se a um estudo paramétrico, com recurso a um programa de elementos finitos, o ADINA [21]. Obtiveram-se cargas de colapso de vigas para as secções 1 e 2 e para as ligas 6060 T6, 6063 T66, 5083 H12 e 5083 H111, tendo em conta a plastificação do material, os efeitos geometricamente não-lineares e ainda imperfeições geométricas. Os resultados obtidos mostram que, ao considerar esbeltezas elásticas, se obtêm resultados com uma dispersão significativa, ao passo que para as esbeltezas elasto-plásticas essa dispersão é bastante mais reduzida. Note-se que esta observação aplica-se também às ligas da classe B, o que está em contradição com os resultados obtidos para a curva de dimensionamento do EC9. Acresce referir que, para valores reduzidos da esbelteza, obtiveram-se resistências significativamente inferiores às fornecidas pelo EC9. Por oposição, para valores elevados da esbelteza, obtiveram-se resistências superiores às do EC9.

Finalmente, a abordagem proposta foi aplicada aos resultados experimentais levados a cabo por Wang et al [1]. Os valores obtidos experimentalmente pelos autores, estão em concordância com os resultados obtidos com o ADINA, sendo as curvas “elásticas” mais dispersas que as curvas “elasto-plásticas. Tal como havia sido observado na análise de resultados obtidos com o ADINA, os resultados experimentais também apresentam valores de resistência inferiores aos do EC9, ficando então claro, que a metodologia do EC9 se encontra contra a segurança. Esta mesma conclusão havia sido obtida pelos autores no estudo que serviu de base de dados aos resultados experimentais [1].

6.2 Desenvolvimentos futuros

Como desenvolvimentos futuros, propõe-se a análise detalhada dos casos onde se obtiveram resistências superiores às da curva da viga ideal, relatados na secção 5.4.

Propõe-se também a extensão da abordagem investigada a vigas com secções transversais com outras geometrias e/ou de classe 3 e 4.

Por fim, recomenda-se um estudo experimental que permita alargar as conclusões obtidas no presente estudo. Em particular, seria importante testar vigas idênticas às analisadas na secção 4.3.1, com modelos de elementos finitos

7. Bibliografia

- [1] WANG, Y.Q., YUAN, H.X., SHI, Y.J. & CHENG M. (2012). *Lateral-torsional buckling resistance of aluminium I-beams*. Vol. 50, p.24-36, Elsevier.
- [2] DAVYSON, S. *Aluminium by Sam Davyson*. Consultado em 18 de agosto de 2013. Disponível em: <http://sam.davyson.com/as/physics/aluminium/site/index.html>
- [3] SOETENS, F. and SNIJDER, H. H. (2006). *New Challenges for Aluminium Structures: An Introduction*. Structural Engineering International
- [4] PENA, G. (2012). *Análise e dimensionamento de colunas de alumínio segundo o Eurocódigo 9*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FCT-UNL
- [5] EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION, EAA (2011). *The aluminum automotive manual*. Consultado em 05/06/2013. Disponível em <http://www.alueurope.eu/aam/>
- [6] GITTER, R. (2008). *Design of Aluminium structures: Selection of Structural Alloys*. Structural Design according to Eurocode 9: Essential Properties of Materials and Background Information. GDA – Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V., Workshop: Eurocodes - Background and Applications, Brussels.
- [7] EAA (2008). *Aluminium and construction*. Consultado em Agosto 2013. Disponível em: http://www.aluminium-award.eu/2009/upload/files/EAA_building_09_2008.pdf
- [8] ESAB - Welding & Cutting United States. *Understanding the aluminum alloy designation system*. Consultado em 23/08/2013. Disponível em: <http://www.esabna.com/us/en/education/knowledge/qa/-Understanding-the-Aluminum-Alloy-Designation-System.cfm>
- [9] SOETENS, F. (2008). *Design of connections*. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands
- [10] <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=215&pageid=2144417089>. Consultado em Agosto 2013
- [11] Croli, A. *State of the art. TALAT, Training in Aluminium Application Technologies*, 1999.
- [12] <http://www.aluminiumleader.com/en/around/construction/>. Consultado em Agosto 2013.

- [13] <http://www.timeout.com.br/rio-de-janeiro/na-cidade/venues/651/riocentro>. Consultado em Agosto 2013.
- [14] <http://www.seimitsu-kogyo.co.jp/en/technology/fw-almitruss.html>. Consultado em Agosto 2013.
- [15] <http://www.aluminium-offshore.com/ekofisk-24-l>. Consultado em Agosto 2013.
- [16] EAA (2003). *Aluminium in the Building and Construction Industries - Recycling Aluminium Construction Materials*. Consultado em 21/07/2013. Disponível em: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1859>
- [17] MALJAARS, J. (2008). *Local Buckling of slender aluminium sections exposed to fire*. PhD thesis in Engineering, Eindhoven, Eindhoven University of Technology.
- [18] CEN, European Committee for Standardization – *Eurocode 9-1-4: Design of aluminium structures: General structural rules*. Brussels, CEN.
- [19] T. Höglund (1999). *Design of members*, in Training in Aluminium Application Technologies Lecture 2301, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- [20] TALAT, EAA (2009). *Design of members*, in Training in Aluminium Application Technologies Lecture 2301.
- [21] BATHE, K. J., ADINA (Versão 8.7) *System*, ADINA RD Inc, 2010.
- [22] ECCS (2006), *Technical Committee 8 – Stability. Rules for Member Stability in EN 1993-1-1*. Background documentation and design guidelines.

Apêndice A

8. Rotinas criadas no MATLAB

A Classificação das secções transversais

```
clear, close all, clc
```

```
%Classificação dos elementos e da secção
```

```
bf = 10*10^(-3);  
tf = 10*10^(-3);  
hw = 110*10^(-3);  
tw = 10*10^(-3);  
fo = 200;
```

```
%legenda das classes da secção
```

```
%Classe A sem soldaduras: classe = 1  
%Classe A com soldaduras: classe = 2  
%Classe B sem soldaduras: classe = 3  
%Classe B com soldaduras: classe = 4
```

```
classe = 3; %classe da liga (ver tabela 6.2 da pag. 58 do EC)
```

```
beta_banzo = bf/tf;
```

```
beta_alma = 0.4*hw/tw;
```

```
%Classificação dos BANZOS
```

```
if classe==1 %Classe A SEM soldaduras
```

```
beta_1_banzo = 3*sqrt(250/fo);  
beta_2_banzo = 4.5*sqrt(250/fo);  
beta_3_banzo = 6*sqrt(250/fo);
```

```
elseif classe==2 %Classe A COM soldaduras
```

```
beta_1_banzo = 2.5*sqrt(250/fo);  
beta_2_banzo = 4*sqrt(250/fo);  
beta_3_banzo = 5*sqrt(250/fo);
```

```
elseif classe==3 %Classe B SEM soldaduras
```

```

beta_1_banzo = 3.5*sqrt(250/fo);
beta_2_banzo = 4.5*sqrt(250/fo);
beta_3_banzo = 5*sqrt(250/fo);

elseif classe==4 %Classe B COM soldaduras

beta_1_banzo = 3*sqrt(250/fo);
beta_2_banzo = 3.5*sqrt(250/fo);
beta_3_banzo = 4*sqrt(250/fo);

else

    'erro na definição da classe (linha 32)'
end

if beta_banzo<=beta_1_banzo
    'banzo é de CLASSE 1'
    classe_do_banzo=1;

elseif beta_1_banzo<beta_banzo<=beta_2_banzo

    'banzo é de CLASSE 2'
    classe_do_banzo=2;

elseif beta_2_banzo<beta_banzo<=beta_3_banzo

    'banzo é de CLASSE 3'
    classe_do_banzo=3;

elseif beta_banzo>beta_3_banzo

    'banzo é de CLASSE 4'
    classe_do_banzo=4;

end

%Classificação da ALMA

if classe==1 %Classe A SEM soldaduras

beta_1_alma = 11*sqrt(250/fo);
beta_2_alma = 16*sqrt(250/fo);
beta_3_alma = 22*sqrt(250/fo);

elseif classe==2 %Classe A COM soldaduras

beta_1_alma = 9*sqrt(250/fo);
beta_2_alma = 13*sqrt(250/fo);
beta_3_alma = 18*sqrt(250/fo);

```

```
elseif classe==3 %Classe B SEM soldaduras

beta_1_alma = 13*sqrt(250/fo);
beta_2_alma = 16.5*sqrt(250/fo);
beta_3_alma = 18*sqrt(250/fo);

elseif classe==4 %Classe B COM soldaduras

beta_1_alma = 10*sqrt(250/fo);
beta_2_alma = 13.5*sqrt(250/fo);
beta_3_alma = 15*sqrt(250/fo);

else

    'erro na definição da classe (linha 32)'
end

if beta_alma<=beta_1_alma
    'alma é de CLASSE 1'
    classe_da_alma=1;

elseif beta_1_alma<beta_alma<=beta_2_alma

    'alma é de CLASSE 2'
    classe_da_alma=2;

elseif beta_2_alma<beta_alma<=beta_3_alma

    'alma é de CLASSE 3'
    classe_da_alma=3;

elseif beta_alma>beta_3_alma

    'alma é de CLASSE 4'
    classe_da_alma=4;

end

beta=[beta_1_banzo beta_2_banzo beta_3_banzo;beta_1_alma beta_2_alma
beta_3_alma];

classe_dos_elementos = [classe_do_banzo classe_da_alma];

CLASSE_DA_SECCAO = max(classe_dos_elementos)
```

B Construção das curvas de encurvadura

```
clear, close all, clc
format long

% dados

bf = 50*10^(-3);
tf = 10*10^(-3);
hw = 110*10^(-3);
tw = 10*10^(-3);
fo = 140*10^3;
E = 70*10^6;

np = 24;

ny = 50;
nz = 50;

G=27*10^6;
v = 0.3;
Ri =0.00001; % Não pode ser 0
Rmax = 0.1;


% Definição de h

h = 2*tf+hw;


% ALMA

index = 1;
for i = 1:nz;
    for j = 1:ny;

        A_Alma(i,j) = index;

        PosY_Alma(i,j) = (j-1)*tw/(2*ny)+tw/(4*ny);

        PosZ_Alma(i,j) = (i-1)*hw/(2*nz)+hw/(4*nz);

        index = index+1;
    end
end, clear index


% BANZO
```

```

index = 1;
for i = 1:nz;
    for j = 1:ny;

        A_Banzo(i,j) = index+ny*nz;

        PosY_Banzo(i,j) = (j-1)*bf/(2*ny)+bf/(4*ny);

        PosZ_Banzo(i,j) = hw/2+(i-1)*tf/(nz)+tf/(2*nz);

        index = index+1;
    end
end, clear index

A = [A_Alma ; A_Banzo];

% Coordenadas dos elementos

PosZ = [PosZ_Alma ; PosZ_Banzo];

PosY = [PosY_Alma ; PosY_Banzo];

% Definição da área de cada elemento

index = 1;
for i = 1:nz;
    for j = 1:ny;

        Ai_Alma(i,j) = (tw/(2*ny)).*(hw/(2*nz));

        Ai_Banzo(i,j) = (bf/(2*ny)).*(tf/(nz));

        index = index+1;
    end
end, clear index

Ai = [Ai_Alma ; Ai_Banzo];

% INICIO DO CICLO

R=Ri; %NOTA: o input R é na verdade a curvatura 1/R
passo_R=0.000001;
lugarmatrix=1; % VETOR que irá guardar os vetores para construção dos
gráficos

while R<Rmax

% INPUTS do ciclo

```

```

tol = 0.0001; % usada na condição do Mcr:while Mcr_ep/M > 1+tol;
passo_L = 0.0001;

% calculo da extensão

extensao = PosZ.* R;

% calculo da tensão

index = 1;
for i = 1:2*nz;
    for j = 1:ny;

        tensao(i,j) = fzero(@(S) extensao(i,j) - (S/E + 0.002 .* (S/fo)^np)
, [0 10^10]);

        index = index+1;
    end
end, clear index

% calculo de Et

Et = (500*E)./(E.*((tensao.^(np-1))./(fo).^np).*np + 500);

Et_Banzo = Et(nz+1:2*nz,1:ny);

% Cálculo das Inércias

% Cálculo de EIy

index = 1;
EIy = 0;
for i = 1:2*nz;
    for j = 1:ny;

        EIy = 4*sum(PosZ(i,j).^2.*Ai(i,j).*Et(i,j))+EIy;

        index = index+1;
    end
end, clear index

Iy = 2*bf*tf^3/12 + bf*tf*(hw/2+tf/2)^2 + tw*hw^3/12;

```


% Cálculo de EIZ

```

index = 1;
EIz = 0;
for i = 1:2*nz;
    for j = 1:ny;

        EIz = 4*sum(PosY(i,j).^2.*Ai(i,j).*Et(i,j))+EIz;

        index = index+1;
    end
end, clear index

```

```

Iz = 2*tf*bf^3/12 + hw*tw^3/12;

```

% Cálculo da função w

```

w_total = zeros(2*nz,ny);
index = 1;
for i = nz+1:2*nz;
    for j = 1:ny

        w_total(i,j) = 2*PosY(i,j).*(h-tf)/4;

        index = index+1;
    end
end, clear index

w = w_total(nz+1:2*nz,1:ny);

```

% Cálculo de EIw

```

index = 1;
EIw = 0;
for i = 1:nz;
    for j = 1:ny;

        EIw = 4*sum((w(i,j).^2).*Ai_Banzo(i,j).*Et_Banzo(i,j))+EIw;

        index = index+1;
    end
end, clear index

Iw = tf*bf^3/24*(h-tf)^2;

```

% Cálculo de EIt ou GJ

```

GJ = G*(2*bf*tf^3+(h-tf)*tw^3)/3;

```

% Cálculo do Momento atuante

```
index = 1;
M = 0;
for i = 1:2*nz;
    for j = 1:ny;

        M = 4*sum(PosZ(i,j).*tensao(i,j).*Ai(i,j))+M;

        index = index+1;
    end
end, clear index
```

% Cálculo do Mcr_ep

```
Mcr_ep = 1.2*M;
L = 0.1;
Mcr_ep/M;

while Mcr_ep/M > 1+tol;

Mcr_ep = pi*sqrt(EIz*GJ)/L*sqrt(1+pi^2*EIw/(L^2*GJ));
Mcr_el = pi*sqrt(E*Iz*GJ)/L*sqrt(1+pi^2*E*Iw/(L^2*GJ));

L = L+passo_L;

end
```

% Cálculo da esbelteza elastoplástica

```
w_el = Iy/(h/2);
w_pl = bf*tf*(h-tf)+hw^2*tw/4;
```

```
Mrd_el = w_pl*fo; ;
Mrd_ep = w_pl*fo;
```

% Curva elástica (Curva em que no eixo x temos a esbelteza_el e no eixo y o coef_red_el)

```
alpha_el = 0.1;
esbelteza_0 = 0.6;

esbelteza_el = sqrt(Mrd_el/Mcr_el);

fi_el = 0.5*(1+alpha_el*(esbelteza_el-esbelteza_0)+esbelteza_el^2);

coef_red_el = 1/(fi_el+sqrt(fi_el^2-esbelteza_el^2));
```

```
% Curva elastoplástica (Curva em que no eixo x temos a esbelteza_ep e no  
% eixo y o coef_red_el)
```

```
esbelteza_ep = sqrt(Mrd_ep./Mcr_ep);
```

```
alpha_ep = 0.1;  
esbelteza_0 = 0.6;
```

```
fi_ep = 0.5*(1+alpha_ep*(esbelteza_el-esbelteza_0)+esbelteza_el^2);  
coef_red_ep = 1/(fi_ep+sqrt(fi_ep^2-esbelteza_el^2));
```

```
% Construção das curvas
```

```
% Curva Elastoplástica
```

```
eixo_x_ep(1,lugarmatrix) = esbelteza_ep;  
eixo_y_ep(1,lugarmatrix) = coef_red_ep;
```

```
% Curva Elástica
```

```
eixo_x_el(1,lugarmatrix) = esbelteza_el;  
eixo_y_el(1,lugarmatrix) = coef_red_el;
```

```
% Curva Ideal
```

```
eixo_x_ideal(1,lugarmatrix) = esbelteza_ep;  
eixo_y_ideal(1,lugarmatrix) = 1./(esbelteza_ep).^2;
```

```
% Lei Constitutiva
```

```
eixo_x_constitutiva = extensao;  
eixo_y_constitutiva = tensao;
```

```
% Displays
```

```
disp_L(1,lugarmatrix) = L;  
disp_esbelteza_el(1,lugarmatrix) = esbelteza_el;  
disp_esbelteza_ep(1,lugarmatrix) = esbelteza_ep;
```

```
disp_Mcr_comp(1,lugarmatrix) = Mcr_ep/Mcr_el;  
disp_Mcr_ep(1,lugarmatrix) = Mcr_ep;  
disp_Mcr_el(1,lugarmatrix) = Mcr_el;  
disp_M(1,lugarmatrix) = M;
```

```
disp_EIz(lugarmatrix,1) = EIz;  
disp_EIw(lugarmatrix,1) = EIw;  
disp_EIz_el(lugarmatrix,1) = E*Iz;  
disp_EIw_el(lugarmatrix,1) = E*Iw;
```

```
disp_racio_Ez(1,lugarmatrix) = EIz/(E*Iz);  
disp_racio_Ew(1,lugarmatrix) = EIw/(E*Iw);
```

```
disp_coef_red_el(lugarmatrix,1) = coef_red_el;
```

```

disp_R(lugarmatrix,1) = R;

disp_eixo_x_ep(lugarmatrix,1) = esbelteza_ep;
disp_eixo_x_el(lugarmatrix,1) = esbelteza_el;
disp_eixo_y(lugarmatrix,1) = coef_red_ep;

lugarmatrix = lugarmatrix+1;

passo_R = passo_R + Ri;

R=R+passo_R;

end

% Displays

M;
Mcr_ep;
Mcr_el;
esbelteza_el;
coef_red_el;

eixo_x_ep; % esbelteza_ep
eixo_y_ep; % coef_red

eixo_x_el; % esbelteza_el
eixo_y_el; % coef_red

disp_Mcr_ep;
disp_M;

% Gráficos

%Curva Elastoplástica, Elástica e Ideal

plot(eixo_x_ep,eixo_y_el,'k') % Curva a preto
hold on
plot(eixo_x_el,eixo_y_el,':') % Curva a tracejado
hold on
plot(eixo_x_ep,eixo_y_ideal,'r') % Curva vermelha
legend('Curva Elastoplástica', 'Curva Elástica (EC9)', 'Curva Ideal')
title('Curvas de Encurvadura')
xlabel('Esbelteza')
ylabel('Coeficiente de Redução')
axis([0 2 0 1.1]);
grid on

% Lei Constitutiva

figure, plot(eixo_x_constitutiva,eixo_y_constitutiva,'k')
title('Lei Constitutiva')

```

```
xlabel('Extensão')
ylabel('Tensão')
grid on
```

C Cálculo do raio de curvatura

```
clear, close all, clc
format long

L = 8.728299999999299;

R = L*(125+1/2000)
```

D Alteração do cálculo do Momento crítico de modo a ter e conta as condições de apoio das vigas que serviram de modelos aos ensaios de Y.Q. Wang, H.X. Yuan, Y.J. Shi e M. Cheng [1]

```
% Cálculo do Mcr

Mcr_ep = 1.2*M;
L = 0.1;
Mcr_ep/M;
kz=0.5;
kw=0.5;
C1=0.1;
cond = pi/(kw*L)*sqrt(EIw/GJ);

while Mcr_ep/M > 1+tol;

if cond>1

    C1 = 1.05;

else
    C1 = 1;

end

Mcr_ep =
C1*pi^2*EIz/(kz*L)^2*sqrt((kz/kw)^2*EIw/EIz+(kz*L)^2*GJ/(pi^2*EIz));

Mcr_el =
C1*pi^2*E*Iz/(kz*L)^2*sqrt((kz/kw)^2*Iw/Iz+(kz*L)^2*GJ/(pi^2*E*Iz));

L = L+passo_L;

end
```